

南海中尺度涡研究进展

郑全安^{1,2,3}, 谢玲玲^{2,1*}, 郑志文⁴, 胡建宇⁵

(1. 马里兰大学 大气与海洋科学系, 美国马里兰州 学院市 20742; 2. 广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东 湛江 524088;

3. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 4. 国立台湾师范大学, 台湾 台北 10610;

5. 厦门大学 地球与海洋学院, 福建 厦门 361005)

摘要:根据维基百科的定义(<https://en.wikipedia.org/wiki/Edd>), 海洋中水平直径在 10~500 km、持续时间由数天至数月之间的水平旋转水体通称为中尺度涡。南海中尺度涡最早发现于 1956 年, 60 a 来的观测与研究表明, 南海是中尺度涡多发、频发海区。南海中尺度涡研究大致经历了早期发现、将中尺度涡当作单体运动现象研究、统计分析和当作群体运动现象研究等阶段, 本文概要评述南海中尺度涡研究发展史和近年最新研究进展。经过 60 a 的观测与研究, 南海中尺度涡的宏观特征, 包括三维结构和运动学, 已大致清楚。南海中尺度涡全年皆可发生, 主要分布在水深大于 1 000 m 的深海盆, 其中吕宋海峡以西和海盆西边界最为集中, 气旋式冷涡和反气旋式暖涡发生概率大致相同。南海中尺度涡海面半径大多分布在 50~150 km, 半径随水深减小, 平均水平尺度比太平洋的涡旋要小。涡旋个数逐月变化, 但季节规律不明显; 年际变化幅度约 20%, 但与 ENSO 无明显对应关系; 年平均个数的统计结果不一, 最少 11 个·a⁻¹, 最多 49 个·a⁻¹。南海中尺度涡旋转流场从表层一直延伸到海底, 流矢量表层(100 m)最大(可达 40 cm·s⁻¹), 随水深减小, 2 000 m 仍可达 3.5~5.0 cm·s⁻¹, 但相对涡旋中心不对称, 涡轴线向西倾斜。南海中尺度涡以 2.0~9.0 cm·s⁻¹ 的速度向西传播, 低速区分布在深海盆东边界和西南部分海域。海面涡度平均值在 5.4×10⁻⁶~20×10⁻⁶ s⁻¹ 区间, 高于太平洋平均值。近期研究把南海中尺度涡视为群体运动现象, 先后提出长寿涡列、驻波模态和罗斯贝标准模等新概念。关于南海中尺度涡的发生机制, 前人多认为黑潮和南海局地为起源。最新观点认为以罗斯贝波和中尺度涡为表现形式的太平洋中尺度扰动直接进入南海, 并与海盆固有振荡模态发生共振, 从而构成太平洋起源。而南海中尺度涡耗散过程、中尺度涡与其他海洋过程的相互作用有待进一步研究。

关键词:南海; 中尺度涡; 长驻涡列; 驻波模态; 罗斯贝标准模态

中图分类号: P73

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)02-0131-28

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.02.001

南海(South China Sea, SCS)是西太平洋最大边缘海。南海是一个近封闭海盆, 其南、北、西三面被陆地包围, 东面被大致南北走向、由台湾岛和菲律宾群岛组成的岛链与北太平洋隔开。吕宋海峡位于台湾岛和吕宋岛之间, 南北宽约 400 km, 是南海与北太平洋之间水交换主要通道, 同时为自太平洋向西传播的罗斯贝波和涡旋等扰动进入南海洞开方便之门。南海南起赤道北至 23°N, 西起 99°E 东至 121°E, 总面积达 3 500×10³ km²。平均深度 1 212 m, 最大深度 5 377 m, 总体积 3 907×10³ km³。其中水深大于 1 000 m 的深海盆长、宽均达 1 000 km 以上, 总面积达 1 000×10³ km²。由此可见, 南海的大体量足以为水平尺度 100~200 km 的中尺度涡生成、运动和演化提供足够的活动空间。事实上, 自从 1956 年 Dale^[1] 最先发现南海存在中尺度涡起, 60 a 来的观测与研究证明, 南海确实是中尺度涡多发、频发海区。本文中我们将概要评述南海中尺度涡发现以来的研究发展史与最新进展。

收稿日期: 2017-01-18

资助项目:国家自然科学基金项目——热带气旋对琼东上升流动力过程和物质输送的影响机制研究(41476009)和台湾海峡与吕宋海峡水体交换及相互作用研究(U1405233); 广东省高等学校优秀青年教师项目——粤西陆架环流的调控机制研究(YQ2015088); 广东海洋大学创新强校项目——热带气旋对上升流动力过程的影响机制(GDOU2016050240)

作者简介: 郑全安(1943-), 男, 山东临沂人, 资深研究员, 博士, 主要从事卫星海洋学和物理海洋学方面研究。E-mail: qzheng2@umd.edu

* **通讯作者:** 谢玲玲(1983-), 女, 山东莱芜人, 副教授, 博士, 主要从事物理海洋学方面研究。E-mail: llingxie@163.com

(李 燕 编辑)

1 大洋中尺度涡的发现与研究简史

早在 20 世纪 30 年代,美国伍兹霍尔海洋研究所海洋学家 Iselin 及其团队首先在西北大西洋湾流海域观测到大型涡旋,当时把这种涡旋称为孤立内波^[2]。10 余 a 后,他们对同一海域一个气旋式冷涡进行了仔细测量与研究,确认其为中尺度涡^[3]。直到 20 世纪 60 年代中期,对中尺度涡动力学的认识日臻完善^[4]。此后,20 世纪 70 年代是中尺度涡大发现时期,仅在 1974—1976 年两年内,美国就在湾流海域发现 93 例^[5]。在此期间具有大范围覆盖能力的卫星图像对中尺度涡发现和研究发挥了重要作用。特别是通过气象卫星红外图像观测到了中尺度涡的全貌,包括海面温度分布、涡旋细结构、运动轨迹以及与周围过程的相互作用。自 20 世纪 90 年代始,卫星高度计海面高度数据产品成为海洋动力现象研究的基本资料。通过卫星高度计海面高度数据二维图像,人们发现了中尺度涡在全球海洋中的广泛存在^[6-7]。

在国内,1979 年郑全安发表了关于海洋中尺度涡的文章^[8],随后开展了对大西洋湾流中尺度涡的研究^[9],郑全安和袁业立^[10]对湾流中尺度涡的衰变过程进行了动力分析。近年来,更多中国学者关注大洋中尺度涡研究。Yang 等^[11]利用 19 a 的卫星高度计海面高度数据分析了西北亚热带太平洋 22 567 个气旋涡和 26 365 个反气旋涡的统计特征和三维结构。他们得出气旋涡的众数半径为 134 km,平均寿命为 11.2 周,而反气旋涡为 121 km 和 10.9 周。大部分涡旋向西传播,平均速度为 $7.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。遇到黑潮后则沿着吕宋—台湾海岸折向北传播。对涡旋的垂直结构,他们发现涡旋引起的温度距平显示出双核结构,而盐度距平呈现三明治结构(sandwich-like pattern)。Zhang 等^[12-13]利用卫星高度计涡旋统计数据估算了北太平洋涡旋扩散系数,还利用 Argo 浮标数据估算全球海洋涡旋热输送。Cui 等^[14]和 Duan 等^[15]利用卫星高度计海面高度数据分别分析了孟加拉湾中尺度涡的统计特征和南大洋的涡旋性质。Cheng 等^[16]利用 19.5 a 的卫星高度计海面高度资料详细分析了到达台湾岛和吕宋岛以东黑潮的涡旋统计特征。在总计 315 个(177 个气旋,138 个反气旋)涡旋中,95%以上产生于太平洋马里亚纳群岛以西的海域。涡旋轨迹统计表明,空间分布上涡旋相对集中在 $18^{\circ} \sim 19^{\circ} \text{N}$ 和 $22^{\circ} \sim 23^{\circ} \text{N}$ 两个纬度带入侵黑潮海域,时间上平均入侵周期分别为 (146 ± 62) 和 (165 ± 46) d。

2 南海中尺度涡的早期发现阶段

1956 年,Dale 在越南中部近海夏季发现一个冷水池(cool pool),这是关于南海中尺度涡的最早报导^[1]。这一发现随后被 Uda 和 Nakao 证实^[17]。1970 年,Nitani 在南海东北部、吕宋岛西北海域发现一个气旋式冷涡,该冷涡被称为 NWL 冷涡^[18]。徐锡桢等^[19]通过对 1921—1970 年共 50 a 历史水文资料的客观分析,推测出南海环流的多涡结构特征及其季节变化,如图 1 所示。这在当时历史条件下是对南海环流认识上重要的概念创新。

1985 年,中国科学院南海研究所报导在南海中部发现一个冬夏均存在的暖涡^[20]。王胄和陈庆生^[21-22]依据 1985-04 南海北部现场水文调查资料发现一个反气旋中尺度涡,该涡水平直径约 200 km,中心位置约为 $(119^{\circ} \text{E}, 21^{\circ} \text{N})$,被称之为南海暖涡(图 2)。随后,1994-08—09,海峡两岸的海洋学家在南海北部开展了联合海洋调查。通过对调查资料的分析发现两个反气旋中尺度涡:一个出现在东沙岛附近,中心位置为 $(117^{\circ} 30' \text{E}, 21^{\circ} 00' \text{N})$,水平尺度约 150 km,中心海面水温比周围高出 7°C ;另一个出现在吕宋海峡中部,中心位置为 $(121^{\circ} \text{E}, 21^{\circ} \text{N})$ 次表层(1 000 db),水平尺度约 100 km(图 2)。这一研究成果的重要意义在于,以可重复的现场观测事实确认了南海中尺度涡的存在^[23]。1995 年,Soong 等^[24]通过分析 1993-12-29—1994-01-05 的 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计数据在南海北部发现一个气旋式中尺度冷涡。通过分析 1995-05 机载投弃式温深仪资料和历史盐度资料,Chu 等^[25-26]识别出 6 个南海中尺度涡,并进一步确认 NWL 冷涡位于 $116^{\circ} \sim 119^{\circ} \text{E}, 19^{\circ} 00' \sim 21^{\circ} 30' \text{N}$ (图 2)。

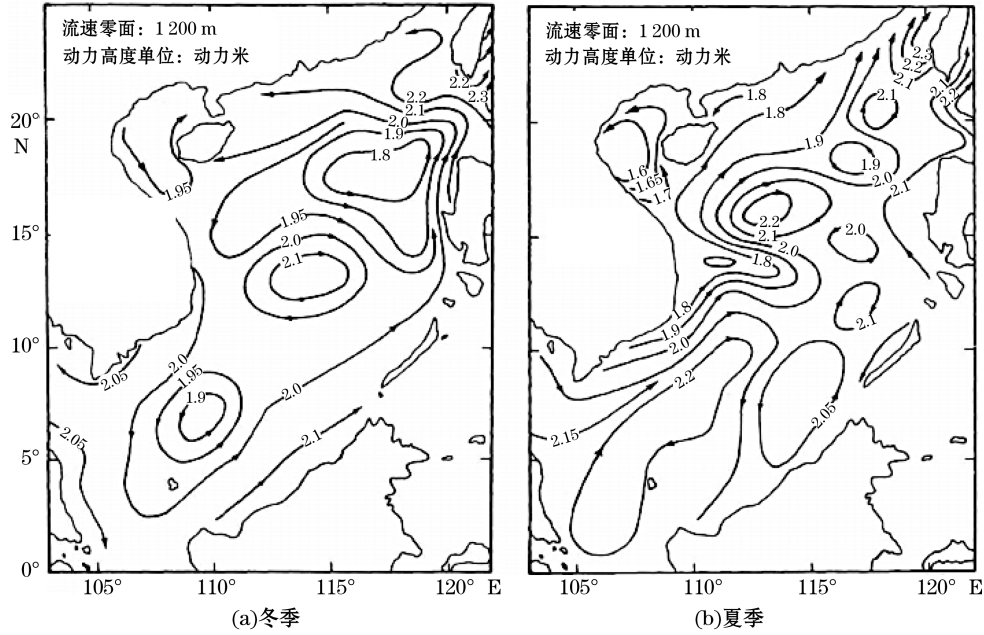
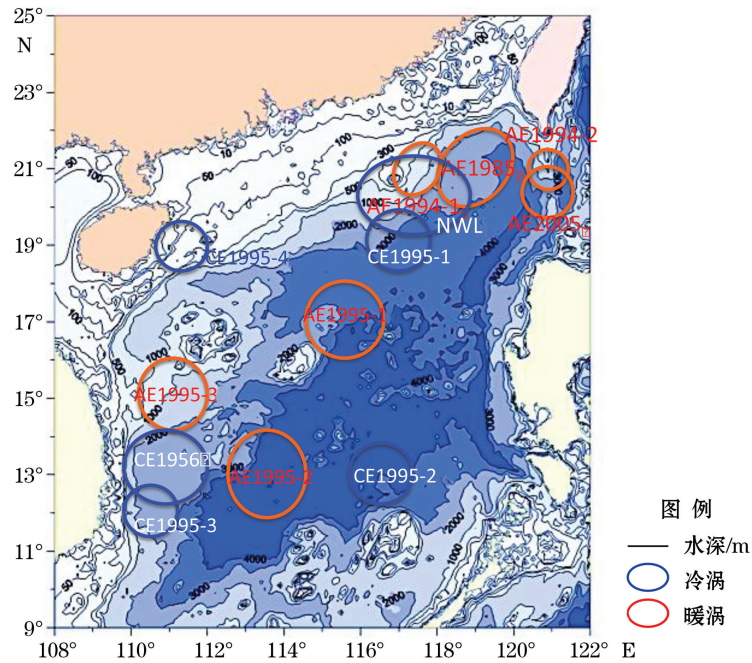


图1 根据1921—1970年历史水文资料推测出的南海环流多涡结构特征及其季节变化^[19]

Fig.1 Multi-eddy structure and seasonal variation of the South China Sea (SCS) circulation derived from historical hydrographic data from 1921 to 1970^[19]



注:CE1956为Dale^[1]发现;NWL为Nitani^[18]发现;AE1985为王胄和陈庆生^[21-22]发现;AE1994-1,-2为Li等^[23]发现;AE1995-1,-2,-3和CE1995-1,-2,-3,-4为Chu等^[25-26]发现;AE2005为Xie等^[27]观测得到

图2 南海深海盆地海底地形图与中尺度涡早期发现

Fig.2 Bottom topographic map of the SCS deep basin and mesoscale eddies discovered at early stage

本文把上述 1956—1998 年定义为南海中尺度涡的早期发现与确认阶段。这一阶段取得的主要成果可以概括为如下 4 点:

1) 主要依据现场水文观测资料,发现并确认了南海中尺度涡的存在。南海中尺度涡全年皆可发生,气旋式冷涡和反气旋式暖涡发生概率大致相同。

2) 中尺度涡地理分布几乎涵盖整个南海深海盆,又以吕宋海峡以西和深海盆西边界较集中。

3) 对中尺度涡的三维尺度大致有所了解。例如,水平尺度在 100~300 km,垂直尺度可达数百米。

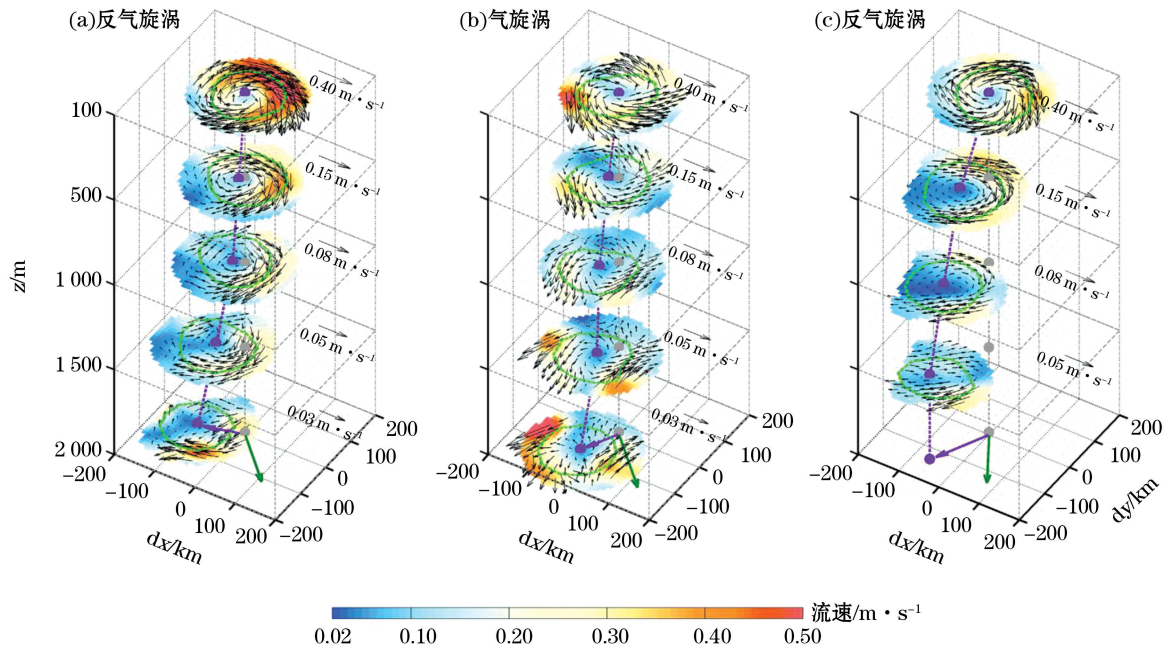
4) 观测到南海中尺度涡的多涡群发特点。

这些早期成果为深入研究南海中尺度涡动力机制以及重新认识南海环流奠定了基础。

3 南海中尺度涡视为单体运动过程研究阶段

南海中尺度涡的发现与确认被越来越多中外学者所关注,逐渐成为南海环流研究热点。特别是进入 21 世纪后,各种先进海洋调查技术几乎同时进入南海中尺度涡研究领域,例如,现场温盐深(CTD)^[27-29]、锚系声波多普勒海流剖面仪(ADCP)^[30-32]、拉格朗日漂流浮标(Lagrangian drifter)^[33-35]、水下滑翔机(Glider)^[36]、卫星高度计^[37-44]、卫星合成孔径雷达(SAR)^[33]和数值模拟等^[45-52]。这些高新技术的应用大力推动了南海中尺度涡研究的发展,促进了一批优秀研究成果问世。

早期研究区多集中在南海北部,特别是吕宋海峡以西海域。例如, Metzger 和 Hurlburt^[53] 在吕宋海峡巴布延群岛以西发现了 8—9 月间产生的反气旋涡。Wang 等^[54] 分析了前 8 a(1993—2000 年)卫星高度计数据,结果显示南海北部,特别是吕宋海峡以西海域为中尺度涡集中区。Wang 等^[55] 利用卫星遥感数据、漂流浮标轨迹数据和现场水文资料详细分析了 2003—2004 年冬季出现在南海北部的 2 个反气旋暖涡的来源和运动。发现 2 个暖涡都沿着南海北部陆坡向西南传播,平均运动速度为 $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,与罗斯贝波相速度类似。可是,作者认为 2 个暖涡的来源不同,一个由南海内部产生,另一个来自黑潮弯曲。Xie 等^[27] 分析了 2005-10 水文和流场现场观测资料,在吕宋海峡中部 500~900 m 中层水发现一个直径约 200 km 反气旋暖涡(图 2)。该涡起到一个局地水体搅拌器的作用:把南海中层水经吕宋海峡北部带出,经吕宋海峡南下,再经吕宋海峡南部反馈南海,体积输送高达 1.9 Sv。Nan 等^[44], Zu 等^[35] 和 Zhang 等^[56] 对出现在台湾岛西南水域的涡旋开展了详细研究。Nan 等^[44] 通过分析 1992-10—2009-10 共 17 a 的卫星高度计数据,发现气旋涡和反气旋涡经常同时存在,但气旋涡数量多于反气旋涡。通常反气旋涡强于气旋涡,而且寿命较长。反气旋涡冬季多发,而气旋涡夏季多发。他们认为这是季风和黑潮流套(Kuroshio Current Loop, KCL)共同作用的结果。Zu 等^[35] 利用海面温度、叶绿素 a 浓度和海面高度等多种卫星资料和海洋再分析数据,研究了 2006-10—11 出现在台湾西南海域一个反气旋涡的三维特征和演化,认为该涡源于黑潮入侵,但与从前在该海域发现的反气旋涡不同,该涡在产生地滞留长达月余并在当地耗散。Zhang 等^[56] 利用长期锚系观测资料、卫星和再分析数据,研究了台湾西南一个由气旋涡和反气旋涡组成的中尺度涡对(eddy pair)及其对深层环流的影响。发现气旋涡把上层海流提高到 $50 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,温度距平达 $-3.0 \text{ }^\circ\text{C}$,而反气旋涡达 $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $7.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。能量分析表明正压与斜压不稳定性对涡对形成和成长起重要作用,而风力的贡献相对小。观测表明涡对穿透到深层,对南海东北深层环流有重大影响。Cheng 等^[57] 分析了南海东北部 2010-08—2013-03 共 2.5 a 连续锚系 ADCP 观测资料,发现海流存在 30~90 d 季节内变化,并认为该信号与中尺度涡传播密切相关。Zhang 等^[58] 利用 2013—2014 年间南海中尺度涡实验(the South China Sea Mesoscale Eddy Experiment, S-MEE)锚系 ADCP 观测数据,构建了南海东北、吕宋海峡以西 1 个气旋涡和 2 个反气旋涡的三维水平流场结构(图 3)。



注:流场断面对应水深为 100,500,1 000,1 500 和 2 000 m

图 3 南海东北吕宋海峡以西两个反气旋涡(a,c)和一个气旋涡(b)的三维水平流场结构^[58]

Fig.3 3D structure of two anticyclonic (a,c) and one cyclonic (b) eddies in the northeastern SCS west of the Luzon Strait^[58]

从图 3 所示的水平流场剖面可以看到这些中尺度涡的如下动力特征:

1)在各水平剖面上,流矢均显示旋转流场。气旋涡显示为逆时针旋转,反气旋涡为顺时针旋转。

2)垂向来看,流矢幅度在表层(100 m)为最大(可达 $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$),随水深减小。旋转流场从表层一直延伸至海底(约 2 000 m),流矢幅度仍达到 $3.5 \sim 5.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。没显示停滞层或逆转层。涡旋水平尺度较稳定。这些都显示这些中尺度涡处于成长阶段,强度大,保持着整体性。

3)从细结构来看,在各水平剖面上,流矢均显示旋转流场相对涡旋中心不对称;涡旋中轴线相对海底垂线向一侧倾斜。这些现象的形成机制值得深入研究。

南海深海盆西边界是另一个中尺度涡多发海域。Hu 等^[28]观测了南海西南部一个冷涡,发现该涡的形成与越南中部离岸斜压射流(coastal baroclinic jet)联系密切。该冷涡八月底生成九月中旬迅速消失,维持约两周。现场实测数据分析揭示该冷涡内部温度、涡度和垂直速度空间分布不对称,中轴线倾斜,等温线和等盐线在冷涡中心部位向上凸起等三维精细结构。Chu 等^[59]和 Wang 等^[60]对西沙群岛附近的中尺度涡进行了观测研究,发现这里的中尺度涡夏季向北传播而冬季则向南传播。Chu 等^[59]发现该海域 2010 年夏季曾出现一个中心海面高度异常(SLA)达 20 cm,水平尺度达 400 km 的强反气旋涡。现场观测资料揭示,该涡中心 75 m 水深温度比周围高出 $7.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。该涡寿命长达 8 个月。作者认为该涡的超常特征与 2009—2010 年 El Niño 事件加强了南海西边界北向风和北向流有关。能量收支分析表明,该涡在向北传播过程中,从边界流吸取能量,使其强度和尺度不断成长。

值得指出的是,上述研究(除 Zheng 等^[33]外)均把南海中尺度涡视为单体运动过程,也就是说,还没考虑中尺度涡之间的内部联系,更没把气旋涡和反气旋涡的空间交替同时出现作为一种群体运动过程来研究。

4 统计特征

当数据样本足够多(长),研究者通过统计分析得出南海中尺度涡时空分布、结构与动力参数特征尺度或

特征值。这些统计分析结果不仅为探讨南海中尺度涡的起源、演化以及内在联系提供重要线索,而且可以作为开展动力分析、经验和数值预报的基本依据。

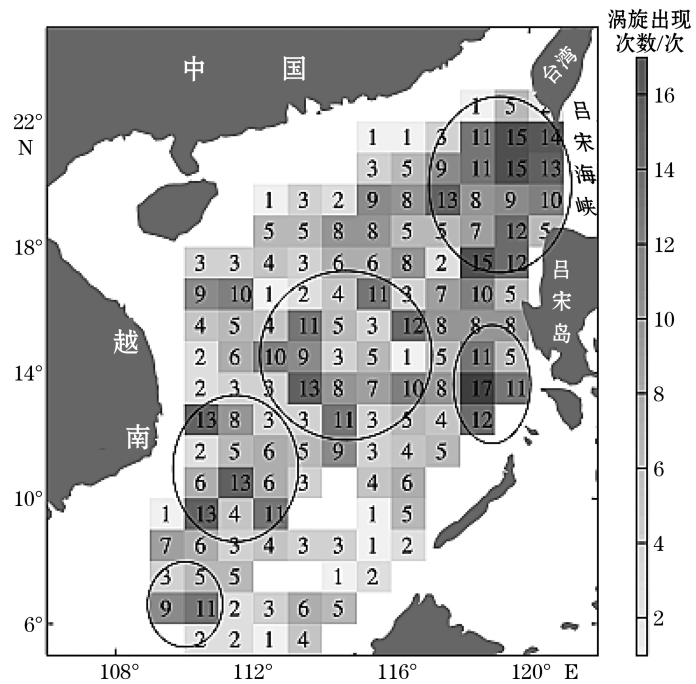
4.1 时空分布统计

Wang 等^[40]利用前 8 a(1993—2000 年)卫星高度计海面高度异常(SLA)数据,对南海中尺度涡时空分布进行了统计分析。他们采用的中尺度涡判据:1)海面高度等值线闭合;2)涡旋中心海面高度高于周边 7.5 cm(连续跟踪 4.0 cm)以上;3)涡旋寿命 30 d 以上;4)涡旋中心所在位置水深在 1 000 m 以上。总共发现 86 个中尺度涡,其中 28 个气旋涡,58 个反气旋涡。南海深海盆东北部吕宋海峡以西和深海盆西边界为相对集中分布区。

Chen 等^[61]利用 1992-10—2009-10 共 17 a 的卫星高度计 SLA 数据(数据长度比 Wang 等^[40]加长一倍以上)对南海中尺度涡时空分布进行了统计再分析。他们采用流线绕角方法(streamline winding angle method, 详见 Sadarjoen 和 Post^[62])从卫星资料中提取了 393 个气旋涡和 434 个反气旋涡(即年平均 48.6 个)。他们把这些涡发生的地理位置进一步细分到 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度网格内,得出 17 a 间南海中尺度涡不分极性空间集合分布图(图 4)。从图 4 可以看出,前人关于南海深海盆东北部吕宋海峡以西和深海盆西边界为中尺度涡相对集中分布区的认识得到确认,同时还显示南海深海盆中部($12^\circ \sim 17^\circ \text{N}$)也是相对集中分布区之一。他们还得出南海中尺度涡的统计平均半径为 132 km,平均寿命为 8.8 周。

Xiu 等^[46]利用三维物理-生物地球化学模式产品和卫星高度计 SLA 数据,对 15 a(1993—2007 年)南海中尺度涡分布特征进行了统计分析。模式预报给出南海中尺度涡年平均发生个数为 (32.9 ± 2.4) 个,而由卫星高度计数据统计得出的结果为 (32.8 ± 3.4) 个。二者基本相同。其中 52% 为气旋涡。涡旋半径分布在 46.5~223.5 km,均值为 87.4 km。半径 100 km 之内的涡旋占总数 70% 以上。涡旋占据的平均海域面积达 160 170 km^2 ,等于南海水深大于 1 000 m 水域面积的 9.8%。依据如此小的涡旋占空比和涡旋个数年际变化并不明显的事实,作者认为南海中尺度涡对 ENSO 事件没有直接响应,风应力旋度对南海中尺度涡产生会是重要机制,但不是唯一机制。

林宏阳等^[63-64]利用 17 a(1993—2009 年)卫星高度计海面高度数据对南海及邻近等的太平洋海域的强中尺度涡进行了统计分析。他们采用的中尺度涡判据与 Wang 等^[40]相同。南海统计结果为,年平均涡旋总数 (21 ± 4) 个,其中气旋涡 (10.3 ± 2.4) 个,反气旋涡 (10.7 ± 2.4) 个。涡旋半径分布在 40~90 km 范围。涡旋的逐月分布和年分布统计直方图如图 5 所示。



注:椭圆大致圈出了相对高发生海域

图 4 由 1992-10—2009-10 卫星高度计 SLA 数据得出的南海中尺度涡不分极性 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度网格分布图^[61]

Fig.4 Distribution map of $1^\circ \times 1^\circ$ grid for the SCS eddies (no matter polarities) derived from satellite altimeter SLA data for the period from October 1992 to October 2009^[61]

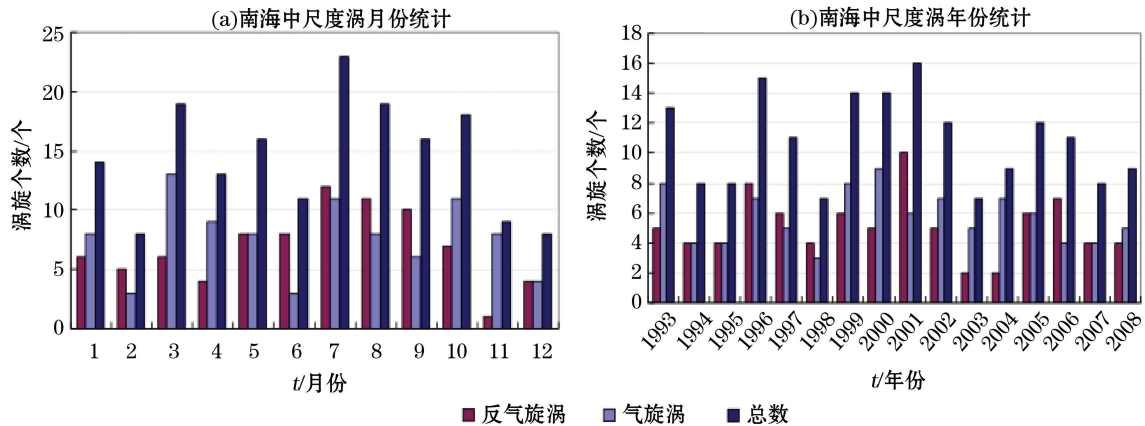


图5 1993—2009年南海强中尺度涡逐月分布和年分布统计直方图^[63]
 Fig.5 Statistical histograms of monthly and annual distributions of strong mesoscale eddies in the SCS from 1993 to 2009^[63]

从图5a所示的南海强中尺度涡月分布统计直方图来看,气旋涡个数没有明显季节变化,而反气旋涡个数和涡旋总数在7—9月间出现一个不甚突出的分布峰。在17a(1993—2009年)统计期间,温和(moderate)El Niño事件发生在2002—2003年,甚强(very strong)El Niño事件发生在1997—1998年,弱(weak)La Niña事件发生在1995—1996年和2000—2001年,温和(moderate)La Niña事件发生在1998—1999年,1999—2000年和2007—2008年。而从图5b所示的南海强中尺度涡年分布统计直方图,看不出涡旋的产生与这些事件有直接联系。这与上述Xiu等^[46]的分析结果一致。

Li等^[34]利用31a(1979—2010年)总计576个海面卫星跟踪漂流浮标轨迹数据,对南海北部(105°~122°E,16°~25°N)的中尺度涡进行了统计分析。他们采用了专门开发的以浮标闭合流套为判据的涡旋识别方法。总共识别出2208个涡旋,其中气旋涡618个,反气旋涡1590个。这些涡旋的空间分布如图6所示。

从图6可以看出,不论气旋涡还是反气旋涡,吕宋海峡以西、南海北陆坡以南均为集中分布区。南海深海盆西边界

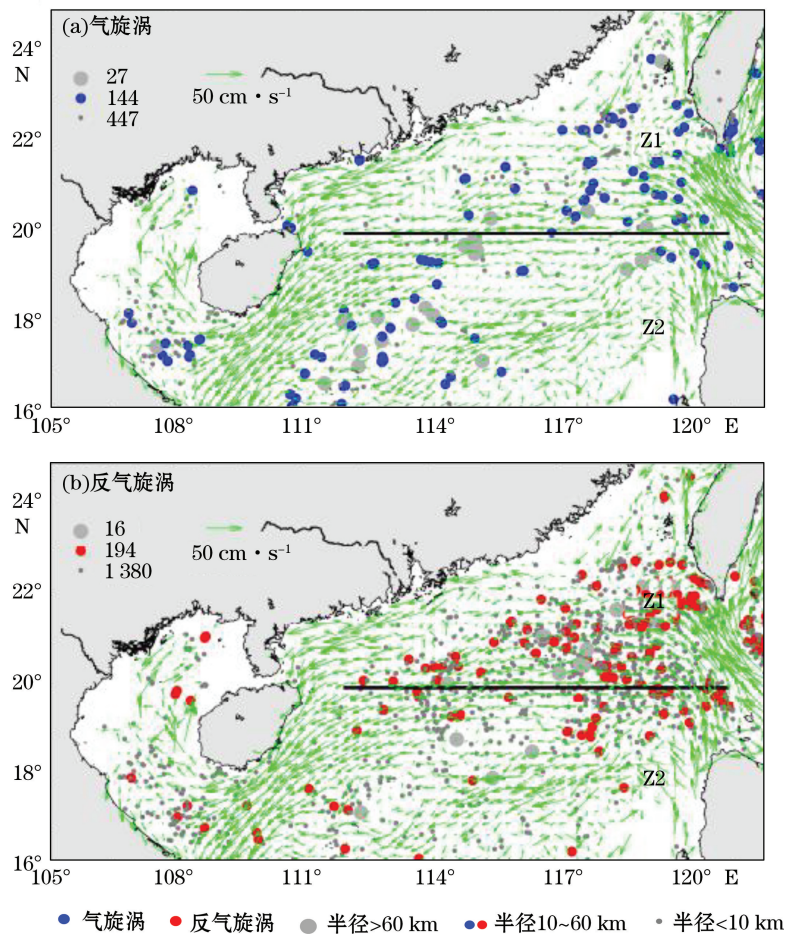


图6 由1979—2010年海面卫星跟踪浮标轨迹数据得出的南海北部618个气旋涡和1590个反气旋涡空间分布图^[34]

Fig.6 Distribution maps of 618 cyclonic and 1590 anticyclonic eddies detected from satellite-tracked drifters in the NSCS from 1979 to 2010^[34]

● 气旋涡 ● 反气旋涡 ● 半径>60 km ● 半径10~60 km ● 半径<10 km

次之。反气旋涡数量远多于气旋涡,这是由于气旋涡中心附近表层生成辐散流,海面漂流浮标不易随涡运动,而反气旋涡中心的辐聚流却极易俘获漂流浮标所致。可以想象这种作用对较小尺度涡旋尤甚。如果只计大、中涡旋,反气旋涡与气旋涡数量比为 210:171(1.2:1),与其他统计结果大致接近。

Li 等^[34]还统计了 1979—2010 年间南海中尺度涡个数逐月分布,结果如图 7 所示。可以看出,反气旋涡个数(总数)呈现冬、夏双峰分布,而气旋涡个数变化不明显。

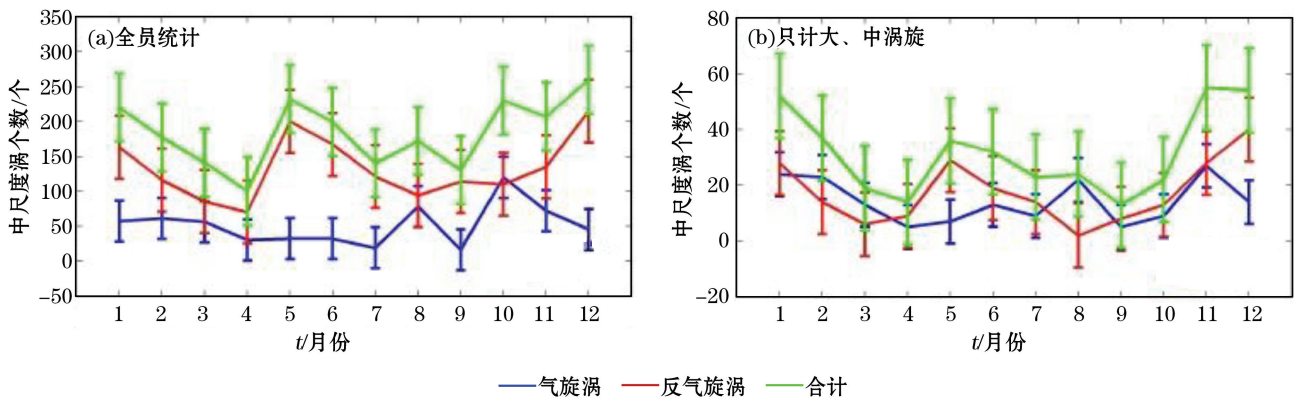


图 7 1979—2010 年间南海中尺度涡个数逐月分布^[34]

Fig.7 Monthly distributions of numbers of mesoscale eddies the SCS from 1979 to 2010^[34]

由于使用的数据类型和样本长短不同,中尺度涡判据也有差异,这使得上述统计结果不尽相同。但这些差异并不妨碍我们从这些统计结果中提取共同点。这些类似“共识”性质的共同点,为我们认识南海中尺度涡的宏观特征提供了最基本、最重要的科学依据:

1)空间分布统计结果显示,南海中尺度涡主要分布在水深大于 1 000 m 的深海盆。海盆东北部吕宋海峡以西和海盆西边界为两个相对集中分布区,深海盆中部为稍次集中分布区。

2)时间分布统计结果显示,南海中尺度涡全年所有月份皆有发生。涡旋个数存在逐月变化。但强涡(半径 50 km 以上、寿命一个月以上)个数逐月分布没显示有规律的季节性变化。南海中尺度涡历年皆有发生。涡旋个数存在年际变化,相对年均变化幅度约 20%。而年际变化信号没显示与 ENSO 事件有直接对应关系。

3)对南海强中尺度涡年均个数的统计给出不同结果,最少的为 $11 \text{ 个} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[40],最多的则达 $49 \text{ 个} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[61]。Wang 等^[40]、Li 等^[34]和林宏阳等^[63-64]所采用的中尺度涡判据都规定寿命一个月以上的旋转水体才被认定为涡旋。这就意味着一个涡旋实际上代表一次中尺度涡事件。即便是以最小的年均个数为依据,南海年均发生强中尺度涡事件高达 11 次之多,仍称得上是中尺度涡多发、频发海域。

4)水平尺度统计结果表明,南海强中尺度涡海面半径大多分布于 50~150 km。这表明南海中尺度涡平均水平尺度比邻接太平洋的涡旋要小。

4.2 海面传播方向和传播速度

海洋中尺度涡形成之时就在地转力、局地环流和地形等的共同作用下运动,除了自身水体转动外,涡旋整体水平移动也会经常发生,这就是中尺度涡的传播现象。Chen 等^[61]利用 1992-10—2009-10 共 17 a 的卫星高度计 SLA 数据对南海中尺度涡传播进行了统计分析,得出南海涡旋水平海面传播统计平均速度矢量场(图 8)。

图 8 所示的南海中尺度涡水平海面传播统计平均速度矢量场是该研究领域具有代表性的成果。从该图可以得出以下南海中尺度涡水平海面传播大致规律:1)在南海深海盆北部,涡旋沿着陆坡向西南传播,平均传播速度约为 $5.0\sim 9.0\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;2)海盆中部($108^{\circ}\sim 121^{\circ}\text{E}$, $13^{\circ}\sim 17^{\circ}\text{N}$),涡旋传播方向稍有发散,但大致向西,平均传播速度约为 $2.0\sim 6.4\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;3) 8°N 以南,涡旋向西或西南传播,平均传播速度约为 $2.0\sim 7.7\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$;4)存在两个明显低速区,一个是深海盆东边界区,另一个是深海盆西南部部分海域($111^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$, $8^{\circ}00'\sim 12^{\circ}30'\text{N}$)。

4.3 海面旋转切向速度和涡度

Li 等^[34]利用漂流浮标数据,得出南海中尺度涡海面旋转统计平均和最大切向速度:气旋涡为 15 和 $30\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,而反气旋涡为 25 和 $40\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

Chen 等^[61]利用 1992-10—2009-10 共 17 a 的卫星高度计 SLA 数据得出南海中尺度涡海面涡度统计平均值:气旋涡为 $5.9\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$,反气旋涡为 $-5.4\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 。Xiu 等^[46]利用三维物理-生物地球化学模式产品和卫星高度计 SLA 数据得出的南海中尺度涡海面涡度统计平均值分布在 $7\times 10^{-6}\sim 20\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 。这些统计平均值均比南海邻接的太平洋中尺度涡度平均值 $5\times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ 高^[11,43,54,65-67]。这表明南海中尺度涡比邻接的太平洋中尺度涡水平旋转快。

4.4 三维特征

上述统计分析结果均以卫星高度计海面高度数据或者海面漂流浮标轨迹数据为依据得出的,因此只能反映南海中尺度涡的海面或表层二维信息统计特征。至于南海中尺度涡的三维统计特征有待于通过分析现场实测水文资料得出。已有学者对南海中尺度涡个例进行过三维现场水文测量与分析,得出了重要成果^[27,58,65-66]。但是迄今为止所积累的三维现场水文测量数据量,特别是时间序列数据长度,尚达不到开展统计分析的最基本要求。Lin 等^[49]另辟蹊径,他们把 Nencioli 等^[68]开发的以矢量几何为基础的三维涡旋检测算法,应用到一个涡旋分辨率数值模式流场产品,产生 2000—2008 年共 9 a 的南海三维涡旋数据集。模式数据在季节和跨季节时间尺度上通过了观测数据的验证,结果表明由模式数据得出的涡旋海面统计特征,例如涡旋个数、寿命和半径,与卫星高度计得出的结果很接近。在水深和涡旋半径不受限条件下,他们检测到 2000—2008 年共 9 a 内寿命大于 4 周的海面涡旋总共为 1 115 个,其中气旋涡 561 个,反气旋涡 554 个,即年平均 124,62 和 62 个。这些数字是 Chen 等^[61]利用 1992-10—2009-10 共 17 a 的卫星高度计 SLA 数据得出的结果(年平均 49,23 和 26 个)的约 2.5 倍。他们通过统计分析得出了涡旋物理特征(包括年平均 EKE(涡动能)、涡旋个数和寿命、涡旋半径空间分布、相对涡度、涡旋传播速度和长寿命涡旋移动路径等)的垂直分布以及涡旋 3D 结构。图 9 和图 10 示出 10,100,300 和 700 m 水深涡旋半径和涡旋传播速度空间分布两项成果,供读者参考。

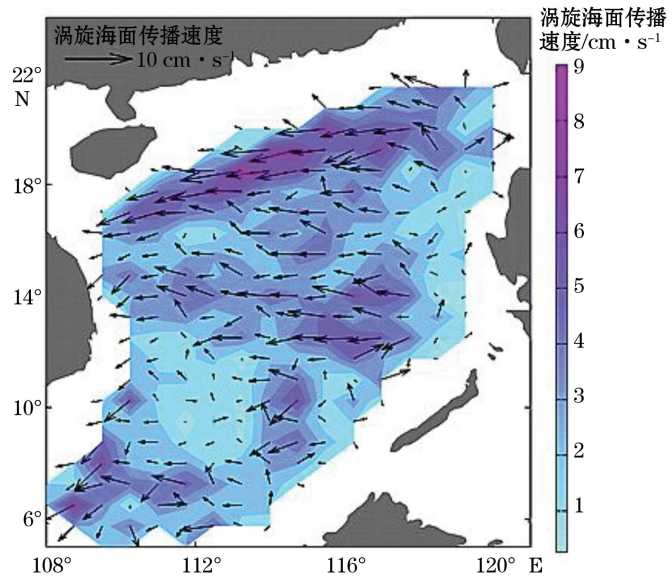
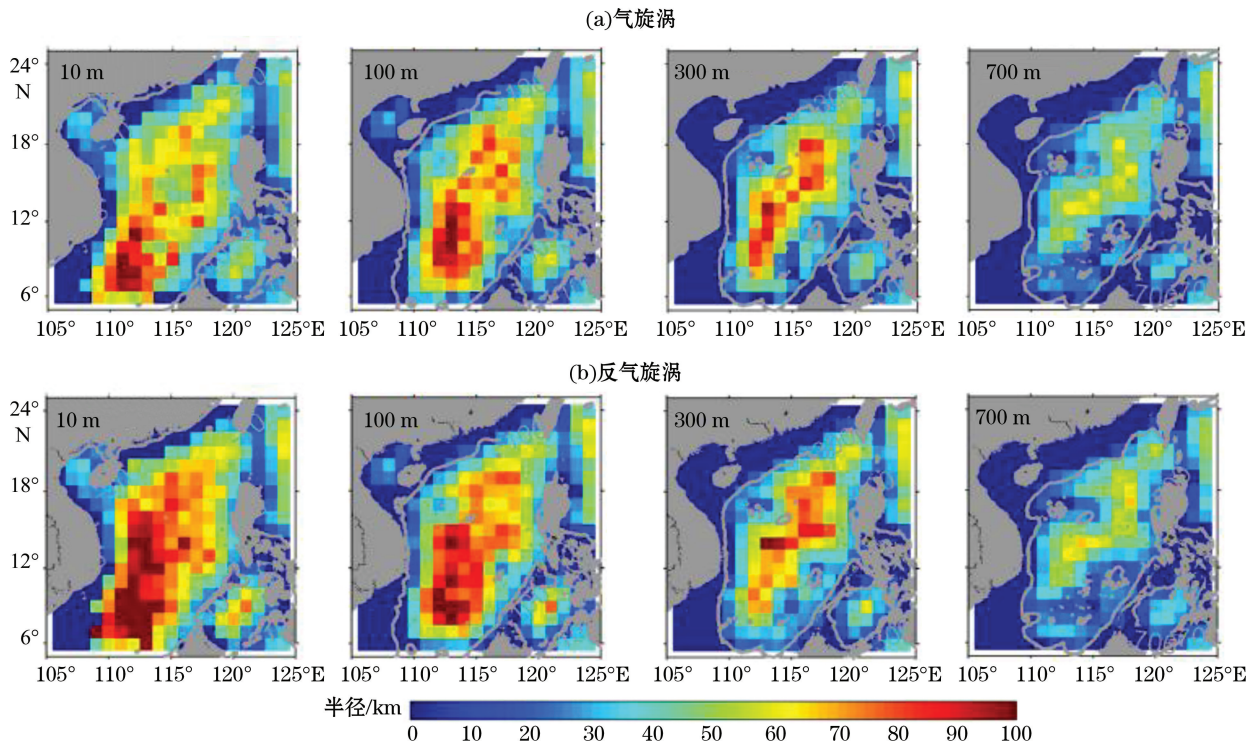


图 8 南海中尺度涡水平海面传播统计平均速度矢量场(1992-10—2009-10)^[61]

Fig.8 Vector field of statistically averaged horizontal propagation velocities of mesoscale eddies at the sea surface in the SCS(1992-10—2009-10)^[61]



注: 灰色等值线分别为 10, 100, 300 和 700 m 等深线

图 9 水深 10, 100, 300 和 700 m 气旋涡和反气旋涡半径的空间分布^[49]

Fig.9 2D distributions of radiuses of cyclonic and anticyclonic eddies at 10, 100, 300 and 700 m^[49]

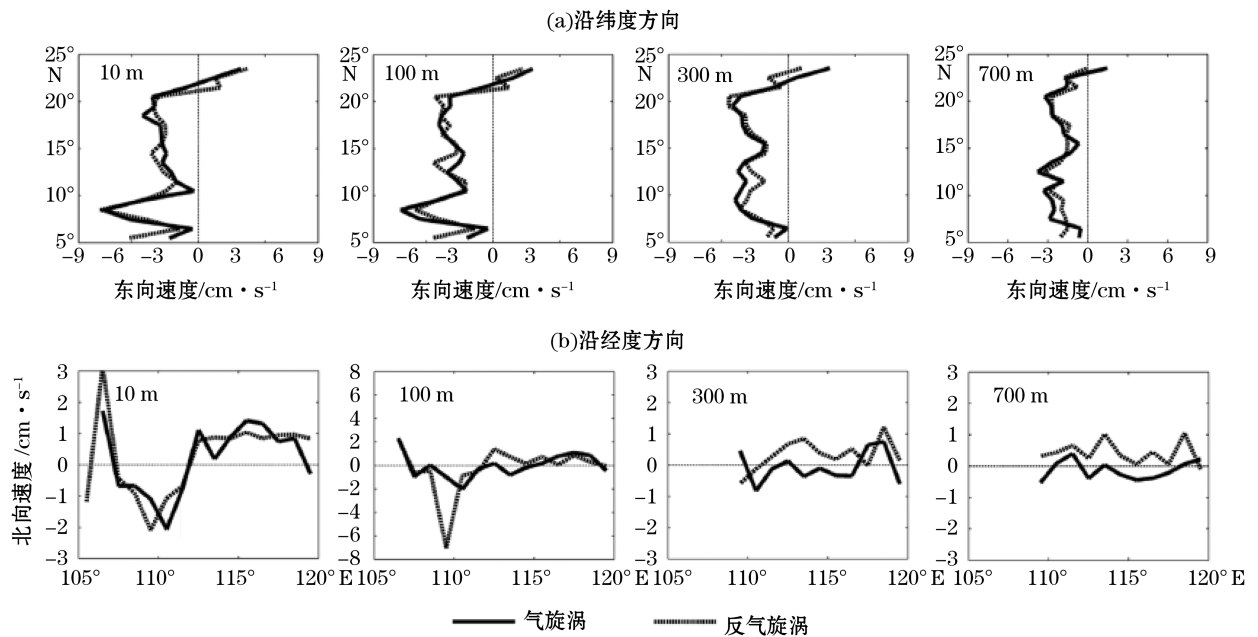


图 10 水深 10, 100, 300 和 700 m 寿命长于 4 周的气旋涡和反气旋涡 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格平均传播速度分布^[49]

Fig.10 Distributions of propagation velocities of cyclonic and anticyclonic eddies with lifetime longer than 4 weeks averaged over $1^\circ \times 1^\circ$ grid at 10, 100, 300 and 700 m^[49]

由图 9 可以看出涡旋半径空间分布的明显特征: 1) 大的涡旋主要分布在南海深海盆西南部; 2) 涡旋半径随水深变化, 上层(10 m)最大, 深层(700 m)变小; 3) 气旋涡和反气旋涡半径分布有差异, 特别是上层差异最明显。

由图 10 可以看出,北纬 23° 以南,涡旋平均传播速度为负值,也就是向西传播,平均速度约为 $2 \sim 3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最大平均传播速度发生在 $8^{\circ} \sim 15^{\circ} \text{N}$ 和 $18^{\circ} \sim 22^{\circ} \text{N}$ 两个纬度带内,而在 8°N 以南和 $22^{\circ} \sim 23^{\circ} \text{N}$ 纬度带内平均西传速度很小。两种涡旋平均传播速度没有显著差异。平均传播速度的垂向变化甚小,这意味着涡旋的整个水体是同步旋转的。

上述根据数模产品得出的南海中尺度涡物理性质三维统计结果,具备统计参量门类齐全和空间分辨率高等特点。通过这些统计结果可以从不同视角观察、认识南海中尺度涡运动或变化的总体趋势。特别是在观测统计结果不足或缺失情况下,可以当作一种理论预测产品使用。

5 南海中尺度涡作为群体运动现象研究阶段

如前所述,最早在 1998 年,Chu 等^[25-26]通过分析机载投弃式温深仪资料和历史盐度资料,发现南海 6 个中尺度涡同时存在,但当时没有提出这些涡作为群体的内在联系。Zheng 等^[33]报导从 2006-11-19 欧洲 EN-VISAT 卫星 ASAR 合成孔径雷达吕宋海峡图像上发现由 5 个水平尺度约 20 km 的涡旋组成的涡串,这是首次把南海中尺度涡视为群体运动过程。由于组成涡串的单涡旋尺度较小,因此作者称其为“亚中尺度海洋涡串(sub-mesoscale ocean vortex train)”。而把更大尺度的南海中尺度涡作为群体运动现象研究则是最近几年出现的新的研究方向,可以认为是南海中尺度涡研究的新进展。当然,这一新阶段的开始并不意味着南海中尺度涡作为单体运动现象研究阶段的结束,目前仍是各走其路。而把南海中尺度涡作为群体运动现象,已经提出过长寿涡列(long-lived eddy row)、驻波模态(standing wave modes)和罗斯贝标准模态(Rossby normal modes)三种认识。

5.1 长寿涡列

如图 11 所示,Nan 等^[44]从 2007 年夏季南海卫星海面高度异常图像中发现沿 3 个反气旋涡 ACE1,ACE2 和 ACE3。这 3 个涡旋卫星高度计可观测到的持续存在时间,或称寿命,长达 147,168 和 210 d,远比南海中尺度涡统计平均寿命,例如 Chen 等^[61]得出的 8.8 周(即 61.6 d),长 $2 \sim 3$ 倍。它们同时存在长达 5 个月之久。因此,作者称其为长寿多涡(long-lived eddies),本文根据 3 个反气旋涡沿 18°N 一字排开的分布特征,称其为长寿涡列(long-lived eddy row)。

虽然 Nan 等^[44]仍然把这些涡旋

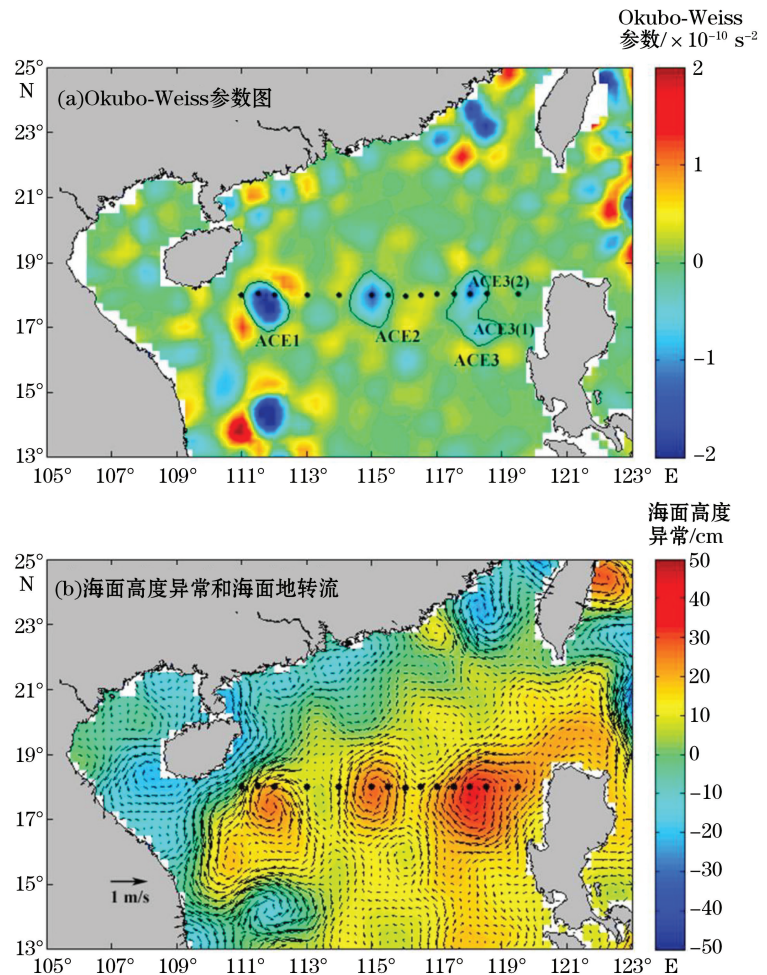


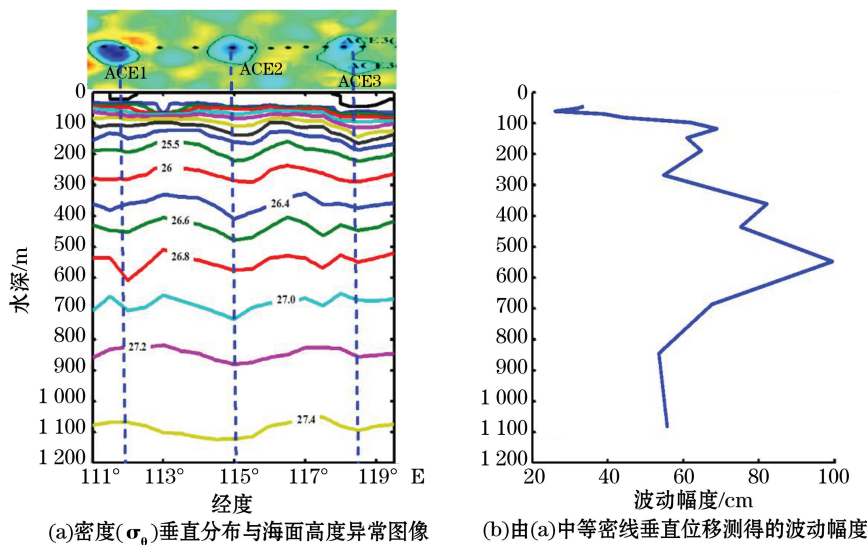
图 11 2007-08-22 南海卫星海面高度异常图像^[44]

Fig.11 Images of satellite altimeter SLA of the NSCS on August 22,2007^[44]

当作单体过程分别进行分析,没有明确指出它们的群体性质,但是文中的数据资料清楚显示出,3个水平尺度约 $O(200)$ km 反气旋涡大致沿 18°N 一字排开,间距大致相等,平均约为 320 km,并且长期同时存在。这些信息已经从客观上揭示出 3 个涡旋组成一个相互联系的群体。至于长寿多涡的产生机制,Nan 等^[44]认为,在西南季风驱动下北向的南海西边界流从 5 月起持续增强,夏季达到最强并在海南岛东南 18°N 附近分出东分支,该海流分支的锋区不稳定性是长寿多涡产生的最基本因素。这一共同产生机制进一步表明 3 个涡旋是一内在相互联系的群体过程。

5.2 驻波模态说

Zheng 等^[69]对 2007 年夏、秋季南海长寿多涡现象进行了更深入观测与研究,首先从 Nan 等^[44]使用的 2007-08-20—24 沿 18°N 断面的水文观测资料中发现,海洋内部存在很强波动信号,波动扰动深达观测最大深度 1 200 m,波动最大垂直幅度达 100 m,如图 12 所示。而与同步的卫星高度计海面高度异常图像中所显示出的 3 个反气旋涡,恰与海洋内部波动信号的波谷一一对应。



(a)密度(σ_θ)垂直分布与海面高度异常图像

(b)由(a)中等密层垂直位移测得的波动幅度

注:原曲线图引自 Zheng 等^[69],原卫星图像取自 Nan 等^[44],本文将二者做成合成图

图 12 根据 2007-08-20—24 沿 18°N 断面测得的水文(CTD)资料计算得出的密度(σ_θ)垂直分布与同步的卫星高度计海面高度异常图像中所显示出的 3 个反气旋涡(上)之间的对应关系(a)以及由(a)得出的波动幅度垂直分布

Fig.12 Corresponding relation of vertical distribution of the density (σ_θ) derived from CTD data measured along 18°N from August 20 to 24, 2007 to three anticyclonic eddies on simultaneous satellite altimeter SLA image (a) and vertical distribution of wave motion amplitudes derived from (a)

通过查阅南海多年卫星高度计数据,Zheng 等^[69]有 2 点重要发现:1)2007 年夏出现在南海北部沿 18°N 分布的 3 个反气旋涡,不但长时间同时存在,而且长时间保持位置不变(图 13)。因此他们认为这 3 个反气旋涡个体表现为涡旋,而作为群体却代表着一个驻波波列;2)这种驻波波列不但经常发生,而且会以气旋涡—反气旋涡交替的二维波动形式出现,形成棋盘状分布结构(图 14 和图 15)。在这些观测事实基础上,再考虑到南海几近封闭的海盆特征,Zheng 等^[69]提出了南海中尺度涡的驻波模态(standing wave modes)说。

驻波模态理论认为一个封闭或半封闭水体存在固有的驻波震荡模态,驻波的波长和频率由水体的水平尺度决定^[70]。对一个长为 L ($x = 0, L$),宽为 l ($y = 0, l$),均匀水深为 H 的长方体海盆,驻波震荡模态具有如下形式^[71-72]

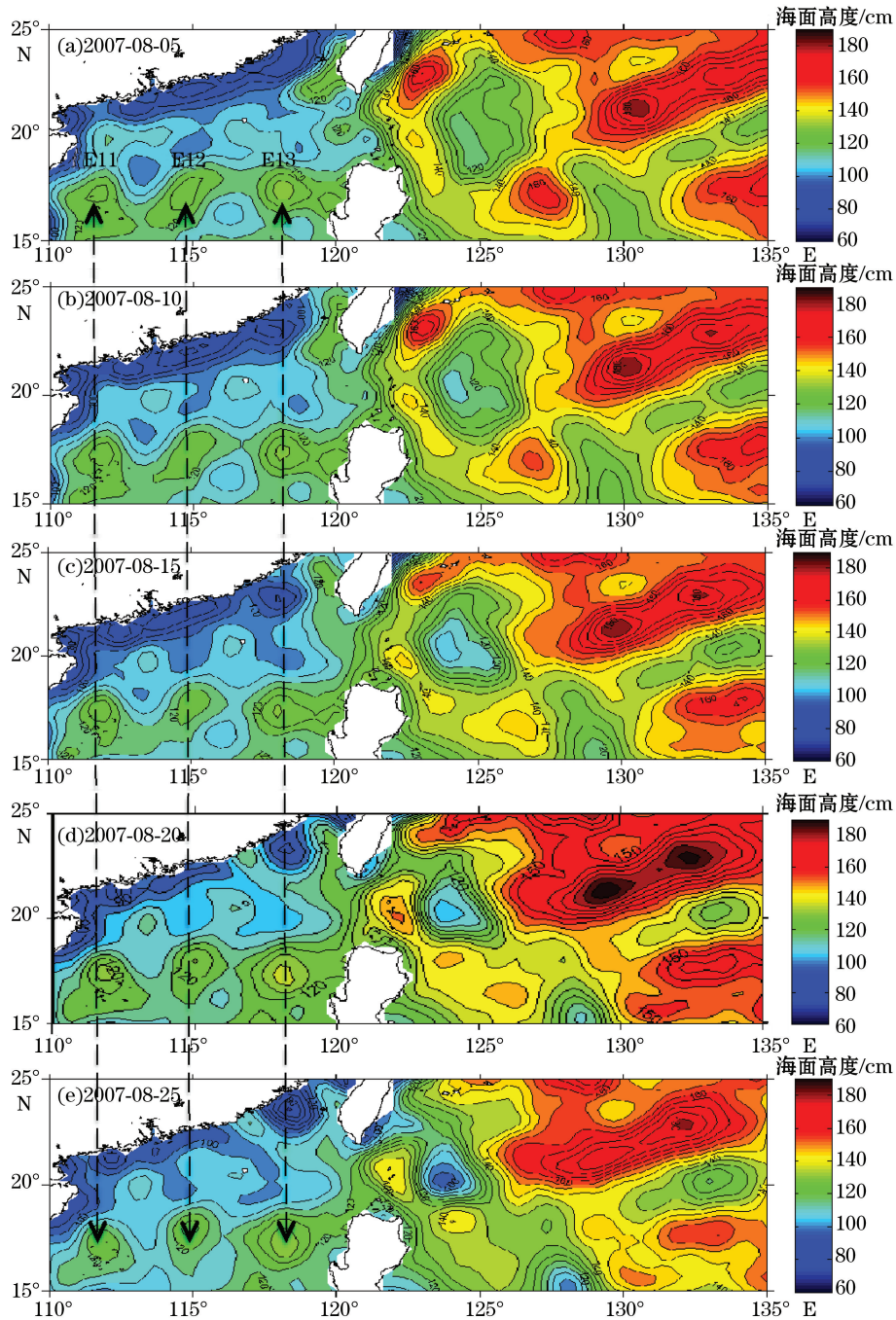
$$\zeta_{m,n}(x,y,t) = A_{m,n} \cos \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{n\pi y}{l} \cos \omega t, \quad (1)$$

式中, $m, n = 0, 1, 2, \dots$, 本征波数为

$$k_{mn} = \left[\left(\frac{m\pi}{L} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \right]^{1/2}; \quad (2)$$

对应的本征周期为^[73]

$$T_{mn} = \frac{2}{\sqrt{gH}} \left[\left(\frac{m}{L} \right)^2 + \left(\frac{n}{l} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (3)$$



注: 3 个高海面中心(反气旋涡)E11, E12 和 E13 沿 18°N 分布

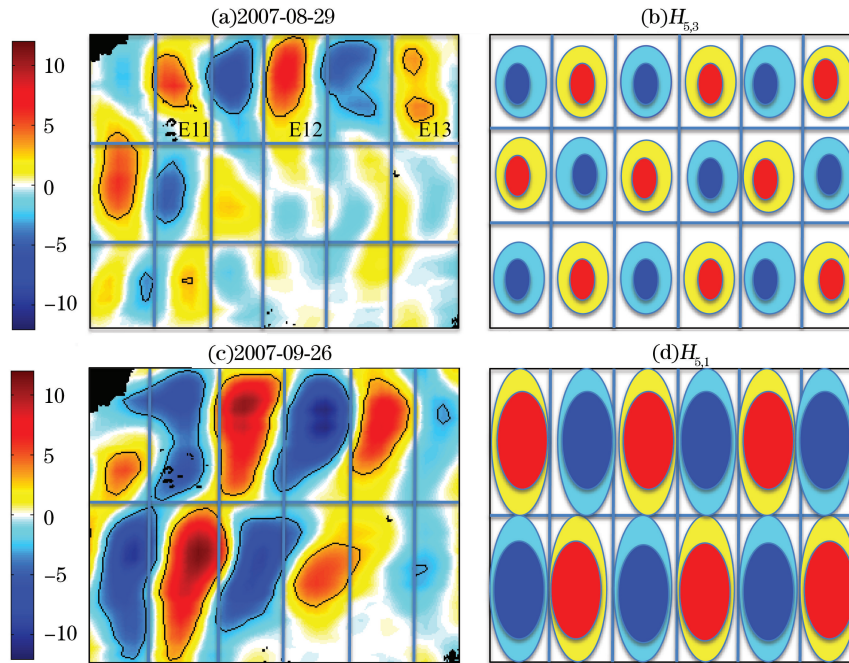
图 13 南海北部和邻接北太平洋海面动力高度图^[69]

Fig.13 Sea surface dynamic height maps of the northern SCS and the adjacent North Pacific^[69]

式中, g 为重力加速度。由式(2)得出本征波长为

$$\lambda_{mn} = 2 \left[\left(\frac{m}{L} \right)^2 + \left(\frac{n}{l} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (4)$$

南海是几近封闭的边缘海,Zheng 等^[69]用一个东西长 1 000 km、南北宽 800 km、海底平坦的长方体模型水体近似代表南海深海盆,得出的驻波模态 $H_{5,3}$ 和 $H_{5,1}$ 如图 14b 和 14d 所示。图 14a 和 14c 分别示出 2007-08-29 和 2007-09-26 南海深海盆海面高度异常经经验模态分解(EMD)得出的 IMF2 分量二维分布图。可以看出,图 14a 和 14b 之间的相似度为 13.5/18.0,而 14c 和 14d 图之间的相似度则高达 10/12。这表明南海深海盆驻波模态确实存在,而且其他动力过程会对其产生调制作用。



注:海面高度异常色码单位为 cm,驻波模态色码为任意单位

图 14 2007-08-29 和 2007-09-26 南海深海盆海面高度异常经 EMD 分解得出的 IMF2 分量二维分布图(a 和 c)与长 1 000 km、宽 800 km、海底平坦的长方体海盆模型的驻波模态 $H_{5,3}$ 和 $H_{5,1}$ (b 和 d) 的比较^[69]

Fig.14 Comparison of 2D distribution maps of IMF2 component derived from EMD analysis of SLA in the SCS deep basin on August 29 and September 26, 2007 to standing wave modes $H_{5,3}$ and $H_{5,1}$ of a model basin with a length of 1 000 km, a width of 800 km and a flat bottom^[69]

驻波模态说产生的科学进步表现在:1)首次明确提出南海中尺度涡存在由气旋涡和反气旋涡组成的群体运动现象,即单体表现为涡旋,而群体表现为波动;2)对南海卫星高度计海面高度异常图像中所显示的棋盘状结构给出了合理解释;3)对 1993—2012 共 20 a 卫星高度计海面高度异常图像的统计分析结果表明,南海驻波模态总的发生频率为 20.9%。年际变化直方图显示高发年份多为正常年份,说明南海驻波模态的发生与 El Niño/La Niña 事件关系不大,这与 Xiu 等^[46]和林宏阳等^[63-64]的结论一致。季节变化直方图显示高发月份为 5 月和 10 月,为东亚季风风力较弱的过渡期^[74-75]。因此,这一统计结果不支持风应力旋度是南海中尺度涡产生重要机制的观点。

驻波模态说的局限性在于:1)理论模型过于简单,没考虑地转效应、层结效应和海底地形的影响;2)不能解释模态随时间变化与转换机制。有鉴于此,Xie 等^①提出了罗斯贝标准模态说。这将在下一节介绍。读者

① XIE L L, ZHENG Q A, ZHANG S, et al. Rossby wave normal modes in the South China Sea deep basin evidenced by satellite altimetry. International Journal of Remote Sensing, submitted, 2017.

将会看到本节介绍的驻波模态仅是罗斯贝标准模态的一个特例。

5.3 罗斯贝标准模态说

最近, Xie 等^①将封闭海盆的罗斯贝标准模态(Rossby normal modes)理论引入南海深海盆海面高度异常二维分布特征分析。对如上所述的长方体封闭海盆, β -平面上线性位涡方程的罗斯贝标准模态解为

$$\zeta_{mn}(x, y, t) = \cos\left(\frac{\beta}{2\sigma_{mn}}x + \sigma_{mn}t\right) \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}y\right) \quad (m, n = 1, 2, 3 \dots), \quad (5)$$

式中, β 为科氏参数 f 的北向梯度, 本征值为

$$\sigma_{mn} = \frac{\beta}{2 \left[\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_i}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (6)$$

式中, R_i 为第 i 阶罗斯贝变形半径(Pedlosky^[76], Xie 等^①), 由式(5)可以看出, 罗斯贝标准模态解由 2 个分量组成: 向西传播的行波分量 $\cos\left(\frac{\beta}{2\sigma_{mn}}x + \sigma_{mn}t\right)$ 和二维 $(x-y)$ 驻波 $\sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{l}y\right)$ 。这就意味着海面高度的二维结构会随时间变化, 从而形成复杂分布图样。而在一个很短观察时间内, 设式(5)中的 $t=0$, 则罗斯贝标准模态呈现为驻波。

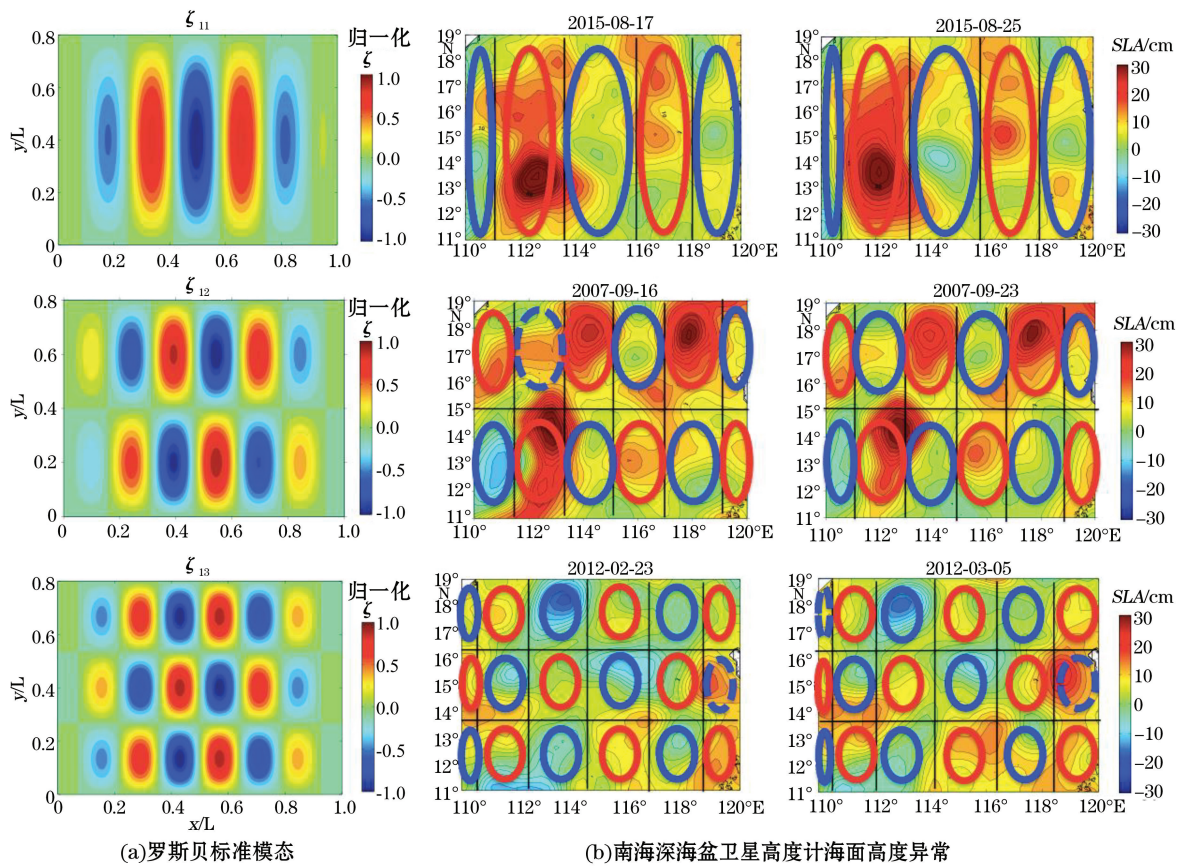


图 15 罗斯贝标准模态 ($m=1; n=1, 2, 3$) 与南海深海盆卫星高度计海面高度异常二维图像的比较^②

Fig.15 Comparison of the Rossby normal modes ($m=1; n=1, 2, 3$) to 2D images of satellite altimeter SLA in the SCS deep basin^②

② 同①

图 15 示出罗斯贝标准模态($m=1; n=1, 2, 3$)与南海深海盆卫星高度计海面高度异常二维图像的比较。南海深海盆范围为 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $11^{\circ}\sim 19^{\circ}\text{N}$, 中心纬度为 15°N , R_i 取为 58 km。由图中得出 ζ_{11} (周期: 114 d, 纬向波长: 364 km, 经向波长: 1 760 km) 与 2015-08-17 和 2015-08-25 的南海深海盆海面高度异常二维图像的相似度为 6/6 和 6/6。罗斯贝标准模态 ζ_{12} (周期: 121 d, 纬向波长: 342 km, 经向波长: 880 km) 与 2007-09-16 和 2007-09-23 的海面高度异常二维图像的相似度为 11/12 和 12/12。罗斯贝标准模态 ζ_{13} (周期: 132 d, 纬向波长: 314 km, 经向波长: 587 km) 与 2012-02-23 和 2012-03-05 的海面高度异常二维图像的相似度为 17/18 和 16/18。这 3 个单一模态的实例表明罗斯贝标准模态理论解与卫星高度计观测到的南海中尺度涡旋场相当吻合。而更多情况则需要多个模态叠加来解释。

罗斯贝标准模态理论是迄今为止用来解释南海二维涡旋场动力机制较完善的理论体系。但应用研究工作尚处起步阶段, 今后一定会不断有新成果问世。

6 发生机制研究

世间万物必有其源, 探究事物的起源是科学家永恒的追求。南海中尺度涡的发生机制、即起源, 自发现涡旋之日起便成为研究焦点, 研究者已经提出了许多各有特色的观点。本文把这些观点大致归纳为局地起源说、黑潮起源说和太平洋起源说三类, 进行概要评述。

6.1 局地起源说

局地起源说的共同特点是把南海中尺度涡的产生归因为南海区域内的一种或多种动力过程。例如, 在大气作用方面, Chu 等^[26]认为南海深海盆暖涡和冷涡皆由风驱动产生。Yuan 等^[41]认为局地风应力旋度是中尺度涡产生的主要机制。而 Wang 等^[55]认为射形风(wind jet)为主要机制。在海洋过程方面, Wang 等^[77]认为南海西北部一个反气旋涡是从一个沿岸涡分离出来的。Gan 和 Qu^[78]、Hu 等^[65]认为越南东南部离岸射流(coastal jet)是南海西部中尺度涡的产生机制。Nan 等^[44]提出海流锋区不稳定性是产生 2007 年夏季沿 18°N 分布的长寿涡列的最基本因素。

上述关于南海中尺度涡起源的观点都是研究者针对所研究的个例提出的, 都没有解释南海中尺度涡多发、群发、有规律分布但又多变的物理机制, 因此不具备普适性。特别需要指出的是, Xiu 等^[46]、林宏阳等^[63-64]和 Zheng 等^[69]利用长时间系列数据从不同角度所做的统计分析得出一个共同结果, 即南海中尺度涡产生与 ENSO 事件没有直接对应关系。而通常认为 ENSO 事件发端于热带西太平洋的西风暴发(westerly wind burst), 南海地处热带西太平洋必然同时发生西风暴发, 然而南海中尺度涡的产生却与这种海盆尺度的风场变化关联不大。这说明他们之间不存在直接因果关系。

5.2 节和 5.3 节介绍的封闭海盆驻波模态和罗斯贝标准模态理论则是典型的局地起源说。因为这 2 种模态都完全由海盆的形状、尺度和地理位置决定, 是海盆自身的固有特征。只要外界扰动达到某个阈值, 固有模态就会起振, 如果再有连续不断的能量供应, 则固有模态就会成长并得以维持。如上 5.3 节所述, 由 Xie 等^③发展的罗斯贝标准模态理论恰当地揭示了南海中尺度涡多发、群发、有规律分布但又多变的物理机制。

6.2 黑潮起源说

黑潮起源说的共同特点是把南海中尺度涡的产生归因为黑潮。持这种观点的研究者认为, 黑潮作为北太平洋强劲的西部边界流, 有时, 特别是冬季, 会通过吕宋海峡入侵南海, 有条件为南海中尺度涡生成提供足够的能量和质量^[79-82]。而中尺度涡产生方式包括: 直接由黑潮流套(Kuroshio loop)、黑潮流弯(Kuroshio meander)和黑潮入侵(Kuroshio intrusion)分离出来^[53, 83], 黑潮流度水平对流(vorticity advection)^[54]、黑潮和风联合作用下产生^[55, 84-85]以及黑潮分支—海岛相互作用产生^[33]。

③ 同①

我们认为南海中尺度涡的黑潮起源说从表观现象来看似有其合理性,但是从动力学来看则有其局限性。这是因为这一观点必须面对如下挑战:

1) 黑潮的动力学定位

黑潮是北太平洋西部边界流,这是众所周知的基本概念。既然是北太平洋西部边界流,那么黑潮的动力特征及其变化则必然由其母体北太平洋的动力过程决定。换句话说,黑潮并不是南海与北太平洋之间的独立第三者,而是北太平洋环流的一个组成部分。特别是在吕宋海峡海域,黑潮的流路和形态则由北太平洋西传扰动与其边缘海南海之间的相互作用来决定。因此,产生于北太平洋、西向传播、经由吕宋海峡进入南海的动力过程才是南海中尺度扰动的根源。

2) 吕宋海峡黑潮在中尺度涡作用下的不稳定性

吕宋海峡平均水深达 2 000 m,是北太平洋西边界一大缺口,其地处 $18^{\circ}30' \sim 21^{\circ}30' \text{N}$ 之间东向恰恰面对北太平洋中尺度涡集中西传的 $18^{\circ} \sim 22^{\circ} \text{N}$ 纬度带。Zheng 等^[67]估算了黑潮和北太平洋西传中尺度涡总动量和总能量之比随涡旋半径的变化,结果如图 16 所示。可以看出当北太平洋西传中尺度涡的半径大于 200 km 时,无论总动量还是总能量,黑潮都变成可以忽略的小量。而多年的卫星高度计海面高度图像显示,这种尺度的中尺度涡在吕宋海峡以东海域并非偶发,而是一年四季司空见惯的现象。

图 17 和 18 示出由卫星高度计海面高度图像显示出的黑潮与中尺度涡相互作用的两个实例。图 17 所示的实例发生在 1994—1995 年冬季。图像显示,一个半径约 150 km 的强气旋涡(中心海面高度 70 cm)将吕宋海峡以东的黑潮流路完全切断,而位于该气旋涡西北的另一强反气旋涡(中心海面高度 170 cm)将高海面水以射性流形式穿过吕宋海峡送入南海(平均流速达 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),形成所谓的黑潮入侵事件。图 18 所示的实例发生在 2004 年夏季,黑潮与中尺度涡相互作用过程几乎与 1994—1995 年冬季实例相同,只不过这次高海面水以流套形式穿过吕宋海峡并将一个半径约 100 km 的反气旋涡送入南海^[67]。

2012-06—2017-06, Lien 等^[86]在吕宋海峡入口沿 $18^{\circ}45' \text{N}$ 布放 6 套潜标测量黑潮流量,得出的黑潮年平均流量为 $(15 \pm 3) \text{ Sv}$ 。他们同时发现太平洋西传涡旋的撞击对黑潮流量有强烈调制作用,气旋涡使黑潮流量减弱,而反气旋涡使黑潮流量增强。一个典型实例是,气旋—反气旋涡对在 10 d 之内引起黑潮流量异常 $> 10 \text{ Sv}$,达到黑潮总流量的 $2/3$ 。这一工作定量证明了吕宋海峡黑潮在中尺度涡作用下的不稳定性。

3) 太平洋西传扰动的高发生频率

长时序卫星高度计海面高度图像显示,上述北太平洋西传中尺度涡迫使黑潮强烈变态的现象是经常发生的^[28]。西起 110°E 东至 135°E 、沿 21°N 穿过吕宋海峡和黑潮水域的现场断面水文调查数据的分析结果表明,源自北太平洋的中尺度扰动向西传播,穿过黑潮水域和吕宋海峡直达南海海盆。在黑潮水域和吕宋海峡以及进入南海后中尺度扰动的动力参数稍有变化,但传播过程是连续的^[87]。这表明对中尺度扰动黑潮起不到南海动力屏障的作用。

从上述动力分析结果和卫星观测实例可以得出如下结论:

(1) 在强大的中尺度涡作用下,吕宋海峡以东黑潮是不稳定的。这表现为流路切断、形态变异以及下游流速变化。这些现象不是偶发的,而是终年经常发生。因此,黑潮不是南海与太平洋之间的独立第三者,其形态由太平洋与南海的相互作用以及中尺度涡活动决定。

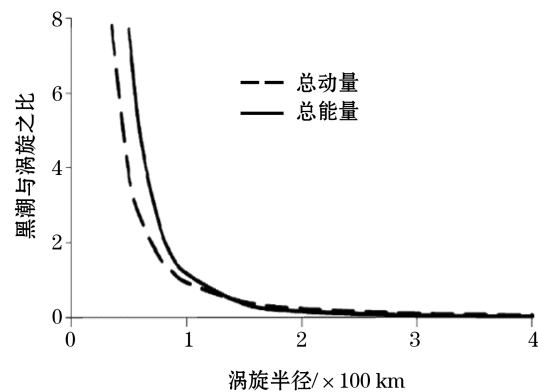


图 16 黑潮和涡旋总动量和总能量之比随涡旋半径的变化曲线^[67]

Fig.16 Ratios of total momentum and total kinetic energy of the Kuroshio and eddy vs eddy radius^[67]

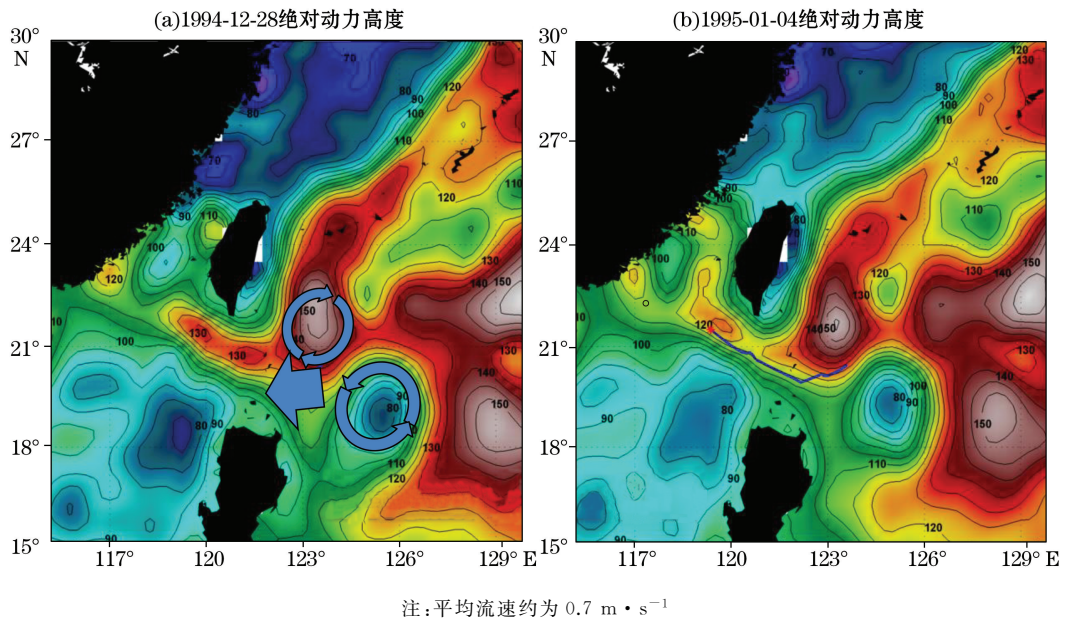


图 17 1994-12-28 和 1995-01-04 吕宋海峡附近卫星高度计海面绝对动力高度(cm)图像
 Fig.17 Satellite altimeter sea surface absolute dynamic height (cm) images in the adjacent ocean areas near the Luzon Strait on December 28,1994 and January 4,1995

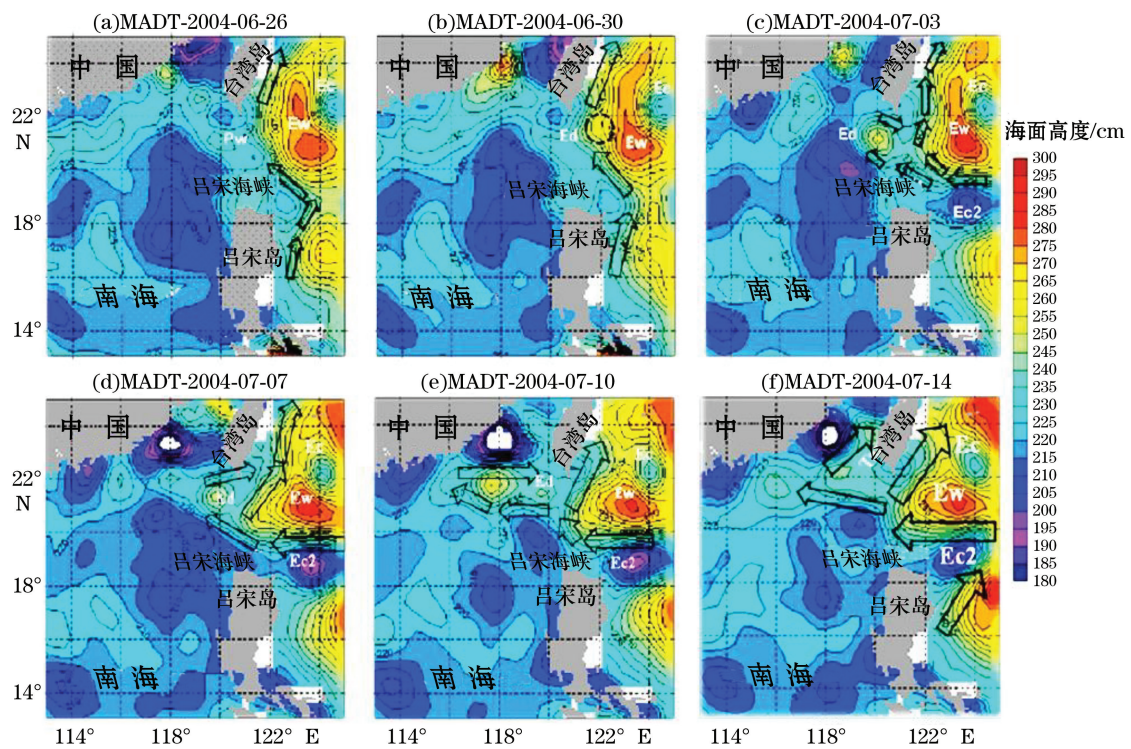


图 18 2004-06-26—07-14 吕宋海峡附近卫星高度计海面绝对动力高度时间系列图像^[67]
 Fig.18 Time series images of satellite altimeter sea surface absolute dynamic height in the adjacent ocean areas near the Luzon Strait from June 26 to July 14,2004^[67]

(2)源自北太平洋的中尺度扰动向西传播穿过黑潮水域和吕宋海峡直达南海海盆。在此过程中,虽然动力参数稍有变化,但传播过程是连续的。这表明对中尺度扰动黑潮起不到南海动力屏障的作用。

(3)在吕宋海峡发生的所谓黑潮入侵、黑潮流套等现象不是黑潮自身的主动行为,而是在强中尺度涡强

迫下发生的,甚至是中尺度涡的直接行为。因此,产生于北太平洋、西向传播、经由吕宋海峡进入南海的动力过程才是南海中尺度扰动的根源。

6.3 太平洋起源说

太平洋起源说是把南海中尺度涡的产生归因为太平洋。这其中包括两种含义,一是太平洋的中尺度涡之一部分直接经由吕宋海峡进入南海,如图 17 和 18 所示;二是太平洋的中尺度扰动经由吕宋海峡传入南海,构成产生中尺度涡和海盆固有振荡模态的初始扰动源,这将在 7.3 节做进一步分析。

1) 卫星观测证据

6.2 节黑潮起源说之 2) 吕宋海峡黑潮在中尺度涡作用下的不稳定性一节,给出了卫星高度计海面高度图像显示出的黑潮与中尺度涡相互作用的 2 个实例。这 2 个实例可同时作为南海中尺度涡起源于北太平洋的证据。这种产生过程的发生频率可达 20 d 左右一次^[28]。

2) 水文观测证据

Hu 等^[28]分析 2010-01 南海北部水文调查资料,在吕宋海峡以西南海深海盆发现一个直径约 150 km 的反气旋涡。该涡的一个突出特征是在次表层 150~300 m 水深存在一个高盐核心,盐度高达 34.8,如图 19f 所示。这么高的盐度不应该是南海水的特征而是太平洋次表层水的特征。同步的 Argo 漂流浮标的剖面数据显示,该涡的次表层高盐核心水直接来源于太平洋次表层水,如图 20b 所示。这一实例表明,源于北太平洋的中尺度涡不但穿越黑潮和吕宋海峡,而且携带着北太平洋水进入南海。

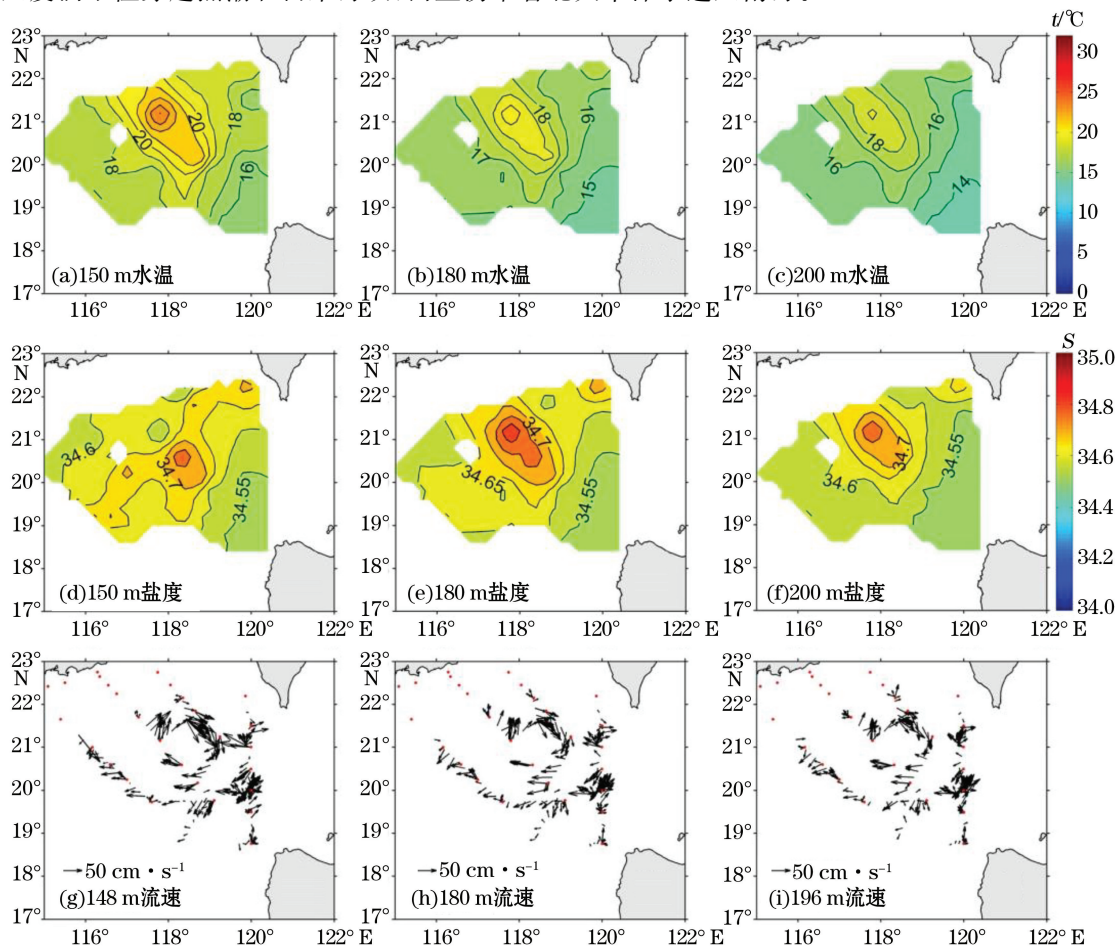
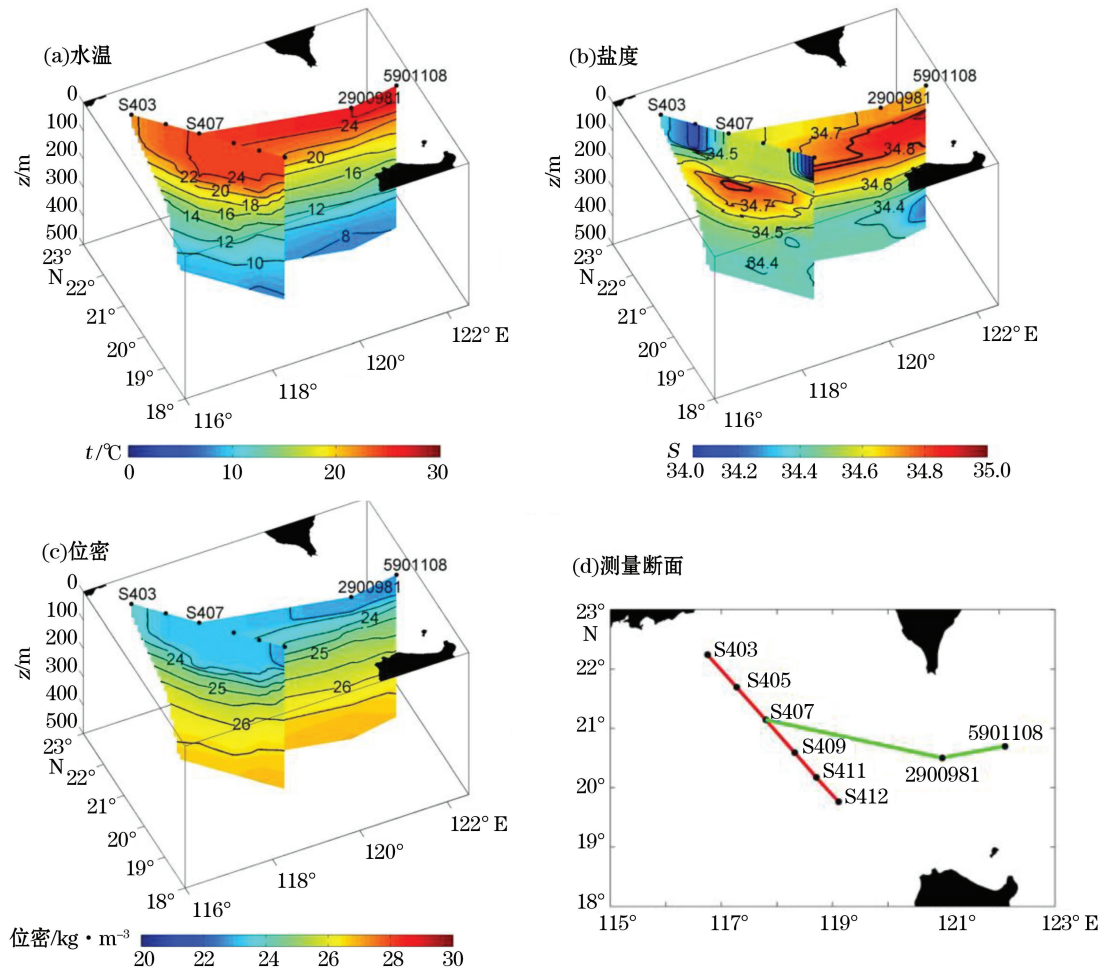


图 19 2010-01-20—30 厦门大学南海北部水文调查在吕宋海峡以西南海深海盆发现的一个直径约 150 km 的反气旋涡^[28]

Fig.19 An anticyclonic eddy with a diameter of 150 km in the SCS deep basin west of the Luzon Strait discovered by hydrographic survey in the NSCS conducted by Xiamen University from January 20 to 30, 2010^[28]

图 20 图 19 所示中尺度涡的垂直结构^[28]Fig.20 Vertical structure of mesoscale eddy shown in Fig.19^[28]

3) 扰动传播路径证据

Zhuang 等^[88]利用卫星高度计海面高度数据和数值模拟产品计算了吕宋海峡东西两侧年平均海面高度变化标准差及其传播速度,并绘制了二维分布图,如图 21 所示。据 Ho 等^[89]的研究结果,海面高度变化标准差高值区即为海洋动力活跃区。因此,图 21 所示的海面高度变化标准差高值区同时给出了海洋动力活跃区的分布和传播路径。可以看到,卫星高度计海面高度数据和数值模拟产品均显示,南海的动力活跃区源自北太平洋,沿南海陆坡向西转向南传播。这正是源自北太平洋的中尺度扰动传入南海的路径。

4) 太平洋西传罗斯贝波

前人已经发现,北太平洋 20°N 和 25°N 之间存在一个纬向带,在该纬向带内中尺度波状涡列终年向西传播^[7,90-93]。Zheng 等^[67]进一步指出北太平洋是涡旋的源,而南海是汇。Xie 等^[87]通过分析 2005-10-11 间南海和北太平洋的水文(CTD)断面调查资料,得出了沿纬向断面分布的等密线波动信号。再利用集合经验模态分解(EEMD)方法将等密线波动信号分解,提取了 3 个西传罗斯贝波主成份,波长分别为 $O(100)$, $O(200)$ 和 $O(550)$ km。这 3 个罗斯贝波主成份沿 21°N 断面的二维($x-z$)分布如图 22 所示。可以看到,3 个罗斯贝波主成份均从太平洋连续传播进入南海,并且前两个波成份在吕宋海峡和南海比在太平洋增强 3~4 倍。

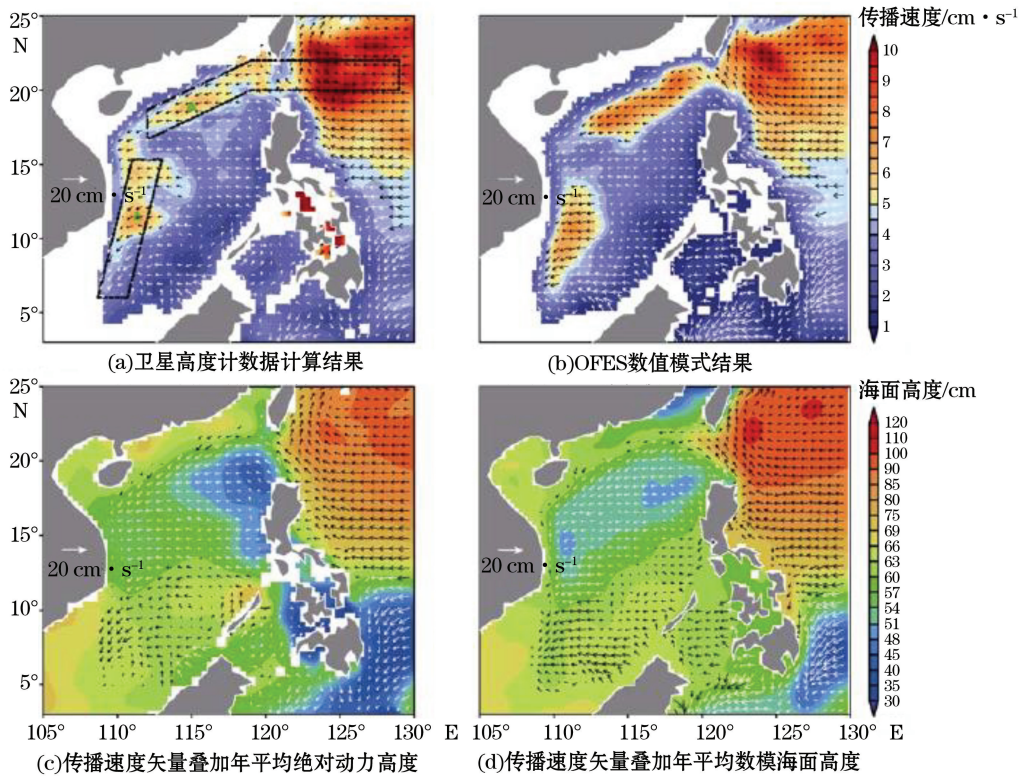


图 21 吕宋海峡东西两侧年平均海面高度变化标准差及其传播速度矢量分布图^[88]

Fig.21 Distribution maps of standard deviation of annual mean sea level height variation and propagation velocity vector on the two sides of the Luzon Strait^[88]

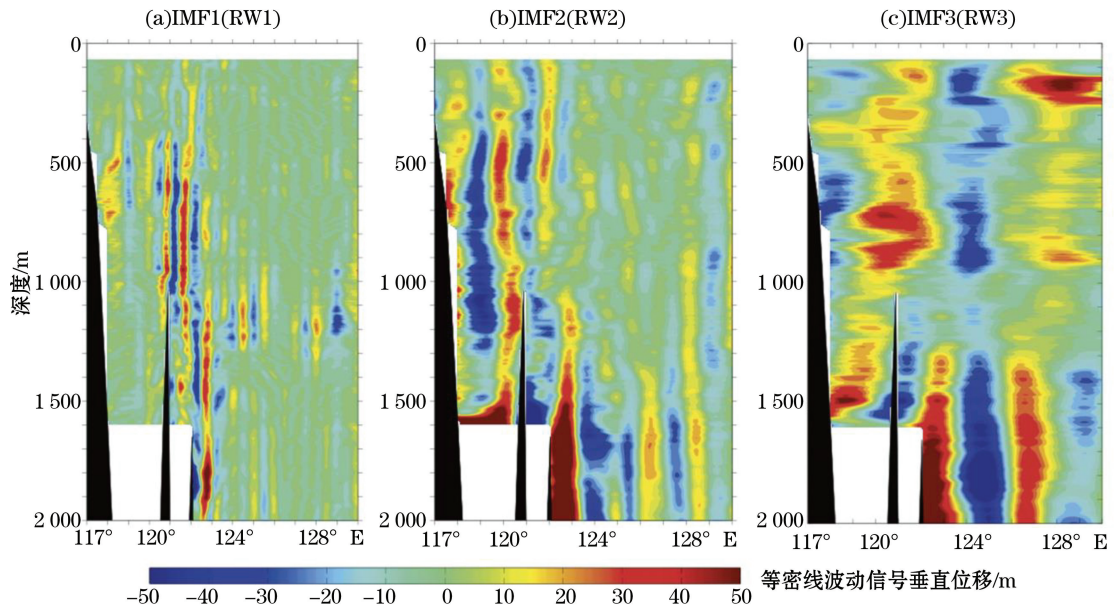


图 22 由断面调查资料得出的 3 个罗斯贝波主成份沿 21°N 断面的二维(x-z)分布图^[87]

Fig.22 2D distribution of three principle components of the Rossby waves derived from cruise measurements along section 21°N^[87]

南海中尺度涡的太平洋起源说是对黑潮起源说的发展与延伸。Xie 等^[87]的工作以现场水文调查资料为依据,确认波长尺度为 $O(100\sim 500)$ km 的太平洋罗斯贝波直接穿过黑潮和吕宋海峡连续传播进入南海。这对南海中尺度涡产生的意义在于:1)罗斯贝波以波状涡列形式西传进入南海,成为南海中尺度涡的直接来源。2)进入南海的罗斯贝波通过共振机制或其他相互作用机制,成为南海固有模态发生的初始扰动源和持续的能量提供者。换句话说,太平洋罗斯贝波是南海二维棋盘状中尺度涡阵生成的始作俑者。

7 讨 论

7.1 关于南海中尺度涡数目

中国有一句俗语叫“如数家珍”。南海中尺度涡的观测与研究从 1956 年最早发现至今已历经 60 a。但是,对南海中尺度涡到底有多少?这样的最基本“家珍”至今尚未数清楚。例如,强中尺度涡(半径 50 km 以上、寿命一个月以上)年平均发生个数的统计结果,最少的为 $11 \text{ 个} \cdot \text{a}^{-1}$,最多的则达 $49 \text{ 个} \cdot \text{a}^{-1}$,相差近 5 倍。这不同的统计结果固然与所采用的中尺度涡判据和统计方法有关,但是这同时给应用者带来困惑:到底以哪一结果为准呢?因此,笔者认为有必要找出一个合理的、有代表性的统计结果。

7.2 关于中尺度扰动自太平洋传入南海路径中的间断点

在许多作者得出的中尺度扰动自太平洋传入南海路径中,以图 21a 和 21b 为例,总是存在若干不连续点(或段)。特别是位于吕宋海峡的间断点,经常被做为扰动不能穿过黑潮的证据。笔者认为太平洋扰动是以波动形式传入南海的,这些间断点是波动在吕宋海峡和南海构成的三维地形边界下传播,经多次反射和干涉产生的波动节点。在这些节点上虽然波动振幅为 0,但并不意味着波动消失。

7.3 入射扰动与半封闭海盆的共振条件

对一与开阔海相连的半封闭海盆,Miles 和 Munk^[94]以及 Wilson^[95]证明半封闭水体内的驻波与由开阔海传来的长波存在共振关系(图 23)。二者之间的频率共振关系,即进入海盆的长波放大系数为

$$H^2(f) = \frac{1}{(1 - f/f_0)^2 + Q^{-2}(f/f_0)^2}, \quad (7)$$

式中, f 为入射长波频率, f_0 为半封闭海盆的固有频率, Q 为海盆的品质因素^[70]。由式(7)可知,当 $f = f_0$,即入射长波频率与半封闭海盆的固有频率相等时,放大系数 H 取最大值 Q ,即发生共振。

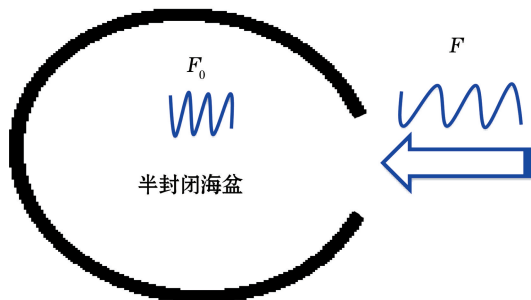


图 23 开阔海入射长波与半封闭海盆固有震荡共振关系示意图
Fig.23 Schema for illustrating resonance of incoming long waves from open sea with intrinsic oscillation in a semi-enclosed water body

对我们的情况而言,图 23 中的半封闭海盆、入口和开阔海对应为南海、吕宋海峡和北太平洋。式(7)则

给出由北太平洋西传进入南海的波状扰动,包括罗斯贝波和波状涡列等,与南海的驻波模态和罗斯贝标准模态等发生共振的频率关系。

8 结 语

本文评述了南海中尺度涡自 1956 年最早发现 60 a 来的观测与研究进展。60 a 来,经过中外海洋学家的不懈努力,南海中尺度涡的宏观特征,包括多发、频发性、三维结构、时空分布统计特征等,大致清楚。南海中尺度涡的发生机制仍有争议,但仅限在 3 大类范围之内。南海中尺度涡在局地环流中的作用及其与陆架和台湾海峡的相互作用正在成为研究热点。但是,一些基本问题,例如中尺度涡数目、中尺度涡耗散过程、中尺度涡与发生在同一海域的其他海洋过程,如内波、近惯性振荡和上升流等的耦合与交换,有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] DALE W L. Winds and drift currents in the South China Sea[J]. *Malay Trop Geogr*, 1956, 8: 1-31.
- [2] GREENE C H. Review of down to the sea for science: 75 years of ocean research, education, and exploration at the Woods Hole Oceanographic Institution[J]. *Oceanography*, 2006, 19(1): 189-191.
- [3] ISELIN C, FUGLISTER F. Some recent developments in the study of the Gulf Stream[J]. *Journal of Marine Research* 1948, 7(3): 317-329.
- [4] FUGLISTER F C. Cyclonic rings formed by the Gulf Stream 1965-1966[M]//GORDON A. *Studies in Phys oceanogr: a tribute to George Wust on his 80th birthday*, New York: Gordon and Breach, 1972: 137-168.
- [5] LAI D Y, RICHARDSON P L. Distribution and movement of Gulf Stream rings[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1977, 7(5): 670-683.
- [6] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M, et al. Global observations of large oceanic eddies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(15): 87-101.
- [7] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91: 167-216.
- [8] ZHENG Q A. Application of remote sensing to study of ocean mesoscale eddies and interpretation of satellite image cases[J]. *Haiyang Xuebao*, 1979, 1(2): 342-357. 郑全安. 遥感在海洋中尺度涡旋研究中的应用及卫星照片实例解译[J]. *海洋学报*, 1979, 1(2): 342-357.
- [9] ZHENG Q A, KLEMAS V, HUANG N E. Dynamics of the slope water off New England and its influence on the Gulf Stream as inferred from satellite IR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 15(2): 135-153.
- [10] ZHENG Q A, YUAN Y L. Study on the analytical model of decay of mesoscale eddy on the continental shelf[J]. *Science in China: Series B*, 1989, 32(9): 1135-1143. 郑全安, 袁业立. 海洋中尺度涡旋在陆架上衰变的解析模式研究[J]. *中国科学: B 辑*, 1989, 32(9): 1135-1143.
- [11] YANG G, WANG F, LI Y, et al. Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific: Ocean; Statistical characteristics and three-dimensional structures[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(4): 1906-1925.
- [12] ZHANG Z W, ZHAO W, TIAN J W, et al. A mesoscale eddy pair southwest of Taiwan and its influence on deep circulation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(12): 6479-6494.
- [13] ZHANG Z W, ZHONG Y S, TIAN J W, et al. Estimation of eddy heat transport in the global ocean from Argo data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(1): 42-47.
- [14] CUI W, YANG J G, MA Y A. A statistical analysis of mesoscale eddies in the Bay of Bengal from 22-year altimetry data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(11): 16-27.
- [15] DUAN Y L, LIU H W, YU W D, et al. Eddy properties in the Pacific sector of the Southern Ocean from satellite altimetry data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(11): 28-34.
- [16] CHENG Y H, HO C R, ZHENG Q A, et al. Statistical features of eddies approaching the Kuroshio east of Taiwan Island and Luzon Island [J]. *Journal of Oceanography*, 2017: 1-12.
- [17] UDA M, NAKO T. Water masses and currents in the South China Sea and their seasonal changes, Paper presented at the 3rd Cooperative Study of the Kuroshio and Adjacent Regions(CSK) Symposium, UNESCO, Bangkok, Thailand, 1972.
- [18] NITANI H. Oceanographic conditions in the sea east of Philippines and Luzon Strait in summer of 1965 and 1966[C]//MARR J D. *The Kuroshio: A symposium on the Japan Current*. Honolulu: East West Center Press, 1970: 213-232.

- [19] XU X Z, QIU Z, CHEN H C. The general description of the horizontal circulation in the South China Sea [C] // Proceedings of the Symposium of the Chinese Society of Marine Hydrology and Meteorology, Chinese Society of Oceanology and Limnology (1980). Beijing: Science Press, 1982: 137-145. 徐锡祯, 邱章, 陈惠昌. 南海水平环流的概述 [C] // 中国海洋湖沼学会水文气象学会学术会议 (1980) 论文集. 北京: 科学出版社, 1982: 137-145.
- [20] SCSIO. Report of comprehensive investigation in the South China Sea (II) [R]. Beijing: China Science Publishing House, 1985: 183-231. 中科院南海海洋研究所. 南中国海海区综合调查报告 (II) [R]. 北京: 科学出版社, 1985: 183-231.
- [21] WANG J, CHEN C S. The warm-core eddy in the northern South China Sea. I. Preliminary observations on the warm-core eddy [J/OL]. *Acta oceanographica Taiwanica*, 1987, 18: 92-103 [2017-01-08]. <http://140.112.114.62/handle/246246/114730>. 王胄, 陈庆生. 南海北部之暖心涡流 (一) 对南海暖涡之初步观测 [J/OL]. *台湾大学海洋学刊*, 1987, 18: 92-103 [2017-01-08]. <http://140.112.114.62/handle/246246/114730>.
- [22] WANG J, CHEN C S. The warm-core eddy in the northern South China Sea. II. A simple mechanism for the establishment and development of the warm-core eddy [J/OL]. *Acta oceanographica Taiwanica*, 1987, 18: 104-113 [2017-01-08]. <http://140.112.114.62/handle/246246/114731>. 王胄, 陈庆生. 南海北部之暖心涡流 (二) 暖心涡流生成与发展简单机制 [J/OL]. *台湾大学海洋学刊*, 1987, 18: 104-113 [2017-01-08]. <http://140.112.114.62/handle/246246/114731>.
- [23] LI L, NOWLIN W D, SU J L. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1998, 45(9): 1469-1482.
- [24] SOONG Y S, HU J H, HO C R, et al. Cold-core eddy detected in South China Sea [J]. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 1995, 76: 345-347.
- [25] CHU P C, FAN C W, LOZANO C J, et al. An airborne expandable bathythermograph (AXBT) survey of the South China Sea, May 1995 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998a, 103(C10): 21637-21652.
- [26] CHU P C, CHEN Y C, LU S H. Wind-driven South China Sea deep basin warm-core/cool-core eddies [J]. *Journal of Oceanography*, 1998, 54: 347-360.
- [27] XIE L L, TIAN J W, ZHANG S W, et al. An anticyclonic eddy in the intermediate layer of the Luzon Strait in autumn 2005 [J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(1): 37-46.
- [28] HU J Y, GAN J P, SUN Z Y, et al. Observed three-dimensional structure of a cold eddy in the southwestern South China Sea [J/OL]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C05016) [2016-12-18]. https://www.researchgate.net/publication/229428156_Observed_three-dimensional_structure_of_a_cold_eddy_in_the_southwestern_South_China_Sea. DOI: 10.1029/2010JC006810.
- [29] HU J Y, ZHENG Q A, SUN Z Y, et al. Penetration of nonlinear Rossby eddies into South China Sea evidenced by cruise data [J/OL]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C3) [2017-03-08]. https://www.researchgate.net/publication/258662692_Penetration_of_nonlinear_Rossby_eddies_into_South_China_Sea_evidenced_by_cruise_data. DOI: 10.1029/2011JC007525.
- [30] CHU P C, FAN C W. Low salinity, cool-core cyclonic eddy detected northwest of Luzon during the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) in July 1998 [J]. *Journal of Oceanography*, 2001, 57(5): 549-563.
- [31] WANG L, GAN J. Delving into three-dimensional structure of the West Luzon Eddy in a regional ocean model [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, 90(8): 48-61.
- [32] LIN Y C, OEY L Y, WANG J, et al. Rossby waves and eddies observed at a temperature mooring in Northern South China Sea [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(2): 517-535.
- [33] ZHENG Q A, LIN H, MENG J M, et al. Sub-mesoscale ocean vortex trains in the Luzon Strait [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C4): 977-990.
- [34] LI J R, ZHANG R, JIN B. Eddy characteristics in the northern South China Sea as inferred from Lagrangian drifter data [J]. *Ocean Science Discussions*, 2011, 7(5): 661-669.
- [35] ZU T T, WANG D X, YAN C X, et al. Evolution of an anticyclonic eddy southwest of Taiwan [J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(5): 519-531.
- [36] SHU Y Q, XIU P, XUE H, et al. Glider-observed anticyclonic eddy in northern South China Sea [J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2016, 19(3): 233-241.
- [37] HWANG C, CHEN S A. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(C10): 23943-23965.
- [38] WANG L, KOBLINSKY C J, HOWDEN S. Mesoscale variability in the South China Sea from the TOPEX/Poseidon altimetry data [J]. *Deep Sea Research*, 2000, 47(4): 681-708.
- [39] LI L. A review on mesoscale oceanographical phenomena in the South China Sea [J]. *Journal of the Oceanography in Taiwan Strait*, 2002, 21(2): 265-274. 李立. 南海中尺度海洋现象研究概述 [J]. *台湾海峡*, 2002, 21(2): 265-274.
- [40] WANG G H, SU J L, CHU P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data [J]. *Geophysical Research Letters*,

- 2003,30(21):2121,doi:10.1029/2003GL018532.
- [41] YUAN D L, HAN W Q, HU D X. Anti-cyclonic eddies northwest of Luzon in summer-fall observed by satellite altimeters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13): L13610, doi:10.1029/2007GL029401.
- [42] CHEN G X, HOU Y J, CHU X Q, et al. The variability of eddy kinetic energy in the South China Sea deduced from satellite altimeter data [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(4): 943-954.
- [43] NAN F, XUE H, XIU P, et al. Oceanic eddy formation and propagation southwest of Taiwan[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: C12045.
- [44] NAN F, HE Z, ZHOU H, et al. Three long-lived anticyclonic eddies in the northern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C5), doi:10.1029/2010JC006790.
- [45] YANG K, SHI P, WANG D, et al. Numerical study about the mesoscale multi-eddy system in the northern South China Sea in winter[J]. *Haiyang Xuebao*, 2000, 22(1): 27-34. 杨昆, 施平, 王东晓, 等. 冬季南海北部中尺度涡旋的数值研究[J]. *海洋学报*, 2000, 22(1): 27-34.
- [46] XIU P, CHAI F, SHI L, et al. A census of eddy activities in the South China Sea during 1993-2007[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, (115): C03012, doi:10.1029/2009JC005657.
- [47] WANG L, GAN J. Delving into three-dimensional structure of the West Luzon Eddy in a regional ocean model[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, 90: 48-61.
- [48] HE Y H, CAI S Q, WANG D X, et al. A model study of Luzon cold eddies in the northern South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 97: 107-123.
- [49] LIN X Y, DONG C M, CHEN D K, et al. Three-dimensional properties of mesoscale eddies in the South China Sea based on eddy-resolving model output[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 99: 46-64.
- [50] SUN H, XIAO R, WANG F, et al. Analysis of the pump-turbine S characteristics using the detached eddy simulation method[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 28(1): 115-122.
- [51] XIA C S, TAE J K, WANG G S, et al. Case study on the three-dimensional structure of meso-scale eddy in the South China Sea based on a high-resolution model[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(2): 29-38.
- [52] ZHAO Y B, LIANG X S, GAN J. Nonlinear multiscale interactions and internal dynamics underlying a typical eddy-shedding event at Luzon Strait[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121: 8208-8229.
- [53] METZGER E J, HURLBURT H E. The nondeterministic nature of Kuroshio penetration and eddy shedding in the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(7): 1712-1732.
- [54] WANG G, SU J, CHU P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(21): 2121-2126.
- [55] WANG D X, XU H Z, LIN J, et al. Anticyclonic eddies in the northeastern South China Sea during winter 2003/2004[J]. *Journal of Oceanography*, 2008, 64(6): 925-936.
- [56] ZHANG Z, LI Y, TIAN J. A modified method to estimate eddy diffusivity in the North Pacific using altimeter eddy statistics[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(4): 925-933.
- [57] CHENG L, ZHANG Z W, ZHAO W, et al. Temporal variability of the current in the northeastern South China Sea revealed by 2.5-year-long moored observations[J]. *Journal of Oceanography*, 2015, 71(4): 361-372.
- [58] ZHANG Z W, TIAN J W, QIU B, et al. Observed 3D structure, generation, and dissipation of oceanic mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 24349.
- [59] CHU X Q, XUE H J, QI Y Q, et al. An exceptional anticyclonic eddy in the South China Sea in 2010[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(2): 881-897.
- [60] WANG Q, ZENG L, ZHOU W, et al. Mesoscale eddies cases study at Xisha waters in the South China Sea in 2009/2010[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(1): 517-532.
- [61] CHEN G X, HOU Y J, CHU X Q. Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C6): 102-108.
- [62] SADARJOEN I A, POST F H. Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry[J]. *Computers & Graphics*, 2000, 24(3): 333-341.
- [63] LIN H Y, HU J Y, ZHENG Q A. Satellite altimeter data analysis of the South China Sea and the northwest Pacific Ocean: Statistical features of oceanic mesoscale eddies[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012, 31(1): 105-113. 林宏阳, 胡建宇, 郑全安. 南海及西北太平洋卫星高度计资料分析: 海洋中尺度涡统计特征[J]. *台湾海峡*, 2012, 31(1): 105-113.
- [64] LIN H Y, HU J Y, ZHENG Q A. Statistical analysis of the features of meso-scale eddies near the Luzon Strait[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(1): 1-7. 林宏阳, 胡建宇, 郑全安. 吕宋海峡附近中尺度涡特征的统计分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 1-7.

- [65] HU J, GAN J, SUN Z, et al. Observed three-dimensional structure of a cold eddy in the southwestern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C5), doi:10.1029/2010JC006810.
- [66] HU J, ZHENG Q, SUN Z, et al. Penetration of nonlinear Rossby eddies into South China Sea evidenced by cruise data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C3), doi:10.1029/2011JC007525.
- [67] ZHENG Q A, TAI C K, HU J, et al. Satellite altimeter observations of nonlinear Rossby eddy-Kuroshio interaction at the Luzon Strait [J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(4):365-376.
- [68] NENCIOLI F, DONG C, DICKEY T, et al. A vector geometry based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(3):564-579.
- [69] ZHENG Q A, HU J Y, ZHU B L, et al. Standing wave modes observed in the South China Sea deep basin[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(7):4185-4199.
- [70] RABINOVICH A B. Seiches and harbor oscillations[M]//KIM Y C. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Singapore: World Scientific, 2009:193-236.
- [71] LAMB H. *Hydrodynamics*[M]. New York: Cambridge University Press, 1945:1-738.
- [72] MEI C C. The applied dynamics of ocean surface waves[J]. *Ocean Engineering*, 1984, 11(3):321.
- [73] RAICHLIN H. Harbor resonance[M]//IPPEN A T. *Estuary and Coastline Hydrodynamics*. New York: McGraw Hill, 1966:281-340.
- [74] GUO Q Y, CAI J N, SHAO X M, et al. Interdecadal variability of East-Asian summer monsoon and its impact on the climate of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4):569-576. 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响[J]. *地理学报*, 2003, 58(4):569-576.
- [75] WANG G, LI J, WANG C, et al. Interactions among the winter monsoon, ocean eddy and ocean thermal front in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C8):8002.
- [76] PEDLOSKY J. *Geophysical Fluid Dynamics*[M]. New York: Springer-Verlag, 1987:374-379.
- [77] WANG G, CHEN D, SU J. Winter eddy genesis in the eastern South China Sea due to orographic wind jets[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(3):726-732.
- [78] GAN J P, QU T D. Coastal jet separation and associated flow variability in the southwest South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2008, 55(1):1-19.
- [79] XUE H, CHAI F, PETTIGREW N, et al. Kuroshio intrusion and the circulation in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(2):23.
- [80] CARUSO M J, GAWARKIEWICZ G G, BEARDSLEY R C. Interannual variability of the Kuroshio intrusion in the South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(4):559-575.
- [81] YUAN D, HAN W, HU D. Surface Kuroshio path in the Luzon Strait area derived from satellite remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C11):63-79.
- [82] HU X M, XIONG X J, QIAO F L, et al. Surface current field and seasonal variability in the Kuroshio and adjacent regions derived from satellite-tracked drifter data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 27(3):11-29.
- [83] LI L, NOWLIN W D, SU J L. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1998, 45(9):1469-1482.
- [84] JIA Y L, LIU Q Y. Eddy shedding from the Kuroshio bend at Luzon Strait[J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60(6):1063-1069.
- [85] JIA Y L, LIU Q Y, LIU W. Primary study of the mechanism of eddy shedding from the Kuroshio bend in Luzon Strait[J]. *Journal of Oceanography*, 2005, 61(6):1017-1027.
- [86] LIEN R C, MA B, CHENG Y H, et al. Modulation of Kuroshio transport by mesoscale eddies at the Luzon Strait entrance[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(4):2129-2142.
- [87] XIE L L, ZHENG Q A, TIAN J W, et al. Cruise observation of Rossby waves with finite wavelengths propagating from the Pacific to the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(10):2897-2913.
- [88] ZHUANG W, DU Y, WANG D X, et al. Pathways of mesoscale variability in the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(5):1055-1067.
- [89] HO C R, KUO N J, ZHENG Q A, et al. Dynamically active areas in the South China Sea detected from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(3):320-328.
- [90] HU J Y, KAWAMURA H, HONG H S, et al. 3~6 months variation of sea surface height in the South China Sea and its adjacent ocean [J]. *Journal of Oceanography*, 2001, 57(1):69-78.
- [91] SHEU W J, WU C R, OEY L Y. Blocking and westward passage of eddies in the Luzon Strait[J]. *Deep Sea Research*, 2010, 57(19-20):

1783-1791.

- [92] POLITO, P S, LIU W T. Global characterization of Rossby waves at several spectral bands[J/OL]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (C1): 3018-3035 [2017-01-06]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000JC000607/epdf>. DOI: 10.1029/2000JC000607.
- [93] POLITO, P S, SATO O T. Do eddies ride on Rossby waves? [J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120: 5417-5435 [2017-01-06]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JC010737/epdf>. DOI: 10.1002/2015JC010737.
- [94] MILES J, MUNK W. Harbor paradox[J]. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 1961, 87: 111-130.
- [95] WILSON B. Seiches[J]. *Advances in Hydrosciences*, 1972, 8: 1-94.

Progress in Research of Mesoscale Eddies in the South China Sea

ZHENG Quan-an^{1,2,3}, XIE Ling-ling^{2,1}, ZHENG Zhe-wen⁴, HU Jian-yu⁵

(1. *Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, Maryland 20742, USA;*

2. *College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;*

3. *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;*

4. *National Taiwan Normal University, Taipei 10610, China;*

5. *College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)*

Abstract: According to Wikipedia (<https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy>), mesoscale eddies in the ocean are rotating water masses with diameters between about 10 and 500 km and lifetime from days to months. Mesoscale eddies in the South China Sea (SCSME) were firstly observed in 1956. Since then, 60-years of observations and investigations have shown that the SCS are a unique ocean area with energetic and high-frequency occurred mesoscale eddies. The research of SCSME has passed stages of early discovery, being studied as a single water mass motion and as grouped water mass motion. This paper reviews the development history and new progress in the research of SCSME. By 60-years of observations and investigations, general characteristics of SCSME, such as the 3D structure and the kinematics, have been mostly revealed. SCSME may occur all year around. They are mainly distributed in the deep basin with the water depth deeper than 1 000 m, in particular concentrated in the west of the Luzon Strait and the western boundary of the basin. The occurrence frequencies of cyclonic eddies and anticyclonic eddies are near the same. The sea surface radiuses of SCSME are mostly distributed with a range from 50 to 150 km. The radius decreases with the water depth. The average horizontal scale of SCSME is smaller than that in the Pacific. The number of SCSMEs has monthly variation, but not obvious seasonal variation. The amplitude of annual variation is about 20%, but correspondence to the ENSO events is not supported by the observations. The statistical results of annual number of SCSMEs are inconsistent. The minimum number is 11 per year, and the maximum is 49 per year. The rotating current field of SCSME extends from the sea surface to the bottom. The current vector reaches the maximum value of $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ at the surface layer of 100 m, decreases with the water depth to $3.5 \sim 5.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ at 2 000 m. SCSMEs propagate westward with velocities from 2.0 to $9.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, and the low velocity areas are distributed in the eastern boundary of the deep basin and the southwestern SCS. The mean value of the sea surface vorticity of SCSMEs is within a range from 5.4×10^{-6} to $20 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, higher than that in the Pacific. Recent investigations treat SCSME as a grouped motion phenomenon, and have proposed new concepts of long-lived eddy row, standing wave modes and the Rossby normal modes. Of the generation mechanisms, previous investigators have suggested the Kuroshio origin and the SCS local origins. The newest point-of-view suggests that disturbance from the Pacific in the form of the Rossby waves and eddies may enter the SCS directly and resonance with intrinsic oscillation modes of the basin, so that forms another Pacific origin. In addition, the dissipation processes and the interaction of SCSMEs with other ocean processes are worth further pursuing.

Key words: South China Sea; mesoscale eddies; long lived eddy row; standing wave modes; Rossby normal modes

Received: January 18, 2017